



TESIS - RC142501

**EVALUASI DAN USULAN PERENCANAAN TULANGAN PENGEKANGAN
(CONFINEMENT) PADA SNI 2847 2013**

JULIO CEZAR HARYANTHO
NRP 3115 202 008

Dosen Pembimbing
Dr. Techn Pujo Aji, ST., MT.
Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
JURUSAN TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN


Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:
Julio Cezar Haryantho
NRP. 3115 202 008

Tanggal Ujian : 14 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017


Disetujui oleh:


1. **Dr. techn. Pujo Aji, S.T., M.T.**
NIP. 19730208 1998 021 001


(Dosen Pembimbing I)


2. **Harun Alrasvid, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP. 19830808 2008 121 005

(Dosen Pembimbing II)


3. **Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP. 19800430 2005 011 002

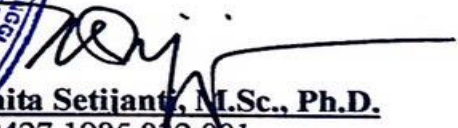
(Dosen Penguji I)


4. **Dr. Ir. Djoko Irawan, M.S.**
NIP. 19590213 1987 011 001

(Dosen Penguji II)



Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Ir. Purwanita Setijanti, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19590427 1985 032 001

STATEMENT OF COMPLIANCE

I hereby truthfully declare that this thesis is original work prepared by me; that I have behaved in accordance with the scientific, ethical principles and rules throughout the stages of preparation, data collection, analysis and presentation of my work; that I have cited the sources of all data and information that could be obtained within the scope of this study, and included these sources in the reference section; and that this study has been scanned for plagiarism.

Surabaya, July 2017

Author,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Julio', with a stylized flourish extending from the end.

Julio Cezar Haryantho

EVALUASI DAN USULAN PERENCANAAN TULANGAN PENGEKANGAN (CONFINEMENT) PADA SNI 2847 2013

Nama Mahasiswa : Julio Cezar Haryantho
NRP : 3115 202 008
Jurusan : Teknik Sipil FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Tech Pujo Aji ST., MT
2. Harun Alrasyid ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Seperti diketahui bahwa fungsi tulangan transversal pada kolom beton bertulang adalah untuk menahan geser, menahan tekuk dan memberi kekangan pada inti kolom beton bertulang. Fungsi kekangan bertujuan agar inti kolom tetap dapat menahan gravitasi setelah selimut kolom mengalami spalling ketika gempa terjadi dan ini merupakan salah satu fungsi kekangan dalam SNI 2847 (2013). Perhitungan kebutuhan tulangan kekangan SNI 2847 (2013) merupakan rasio dari luas penampang kolom terhadap luas inti kolom beton yang terkekang dan rasio kuat tekan beton (f'_c) terhadap kuat leleh tulangan pengekangan (f_{yt}). Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa perumusan kebutuhan tulangan kekangan SNI 2847 2013 yang bersumber pada ACI 318 2011 tidak mengikutsertakan efek beban aksial tekan dan parameter deformasi. Sehingga perumusan tersebut tidak menghasilkan kinerja kolom yang sama dengan beban aksial tekan yang berbeda. Selain itu perumusan kebutuhan tulangan kekangan tersebut tidak mengakomodasi efek – efek penggunaan beton dan tulangan mutu tinggi (*high-strength concrete and high-strength steel*).

Penelitian ini membahas pentingnya tulangan transversal sebagai pengekan seismic beton bertulang dalam hal ini perumusan kebutuhan tulangan pengekan oleh SNI 2847 (2013). Desain pengekan yang terbaru mengharuskan kolom tetap berdiri setelah mengalami tekanan aksial tertentu dan displacement. Akan tetapi, kegunaan ini tidak memperhitungkan efek geser. Sebuah pendekatan formulasi untuk menentukan jumlah kebutuhan tulangan pengekan yang memperhitungkan efek geser akan diajukan. Metode ini berdasarkan kombinasi efek aksial dan tegangan geser yang ditemukan pada kriteria kegagalan coulomb. Formulasi yang diusulkan kemudian diuji pada 163 database hasil uji kolom dan dibandingkan dengan beberapa building code. Hasil menunjukkan bahwa formulasi yang diajukan dapat mereduksi jumlah kebutuhan pengekan yang aman untuk kolom – kolom yang ada

Kata kunci: pengekan, kriteria coulomb, beton bertulang

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

EVALUATION AND PROPOSED DESIGN OF TRANSVERSAL REINFORCEMENT CONFINEMENT ON SNI 2847 2013

Name : Julio Cezar Haryantho
NRP : 3115 202 008
Departement : Teknik Sipil FTSP-ITS
Advisor : 1. Dr. Tech Pujo Aji ST., MT
2. Harun Alrasyid ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

It is well known that the function of transversal reinforcement on reinforce concrete column are to resist shear, hold buckling and to confine the core of the reinforce concrete column. The function of the concrete is to make sure the core of the column still can hold gravitation after the cover has spalling when earthquake happen which it is one of the confinement function in SNI 2847 (2013). Formulation of transversal reinforcement on SNI 2847 (2013) is the ration of gross area of the column to core area of the column and also the ratio of concrete compressive strength (f'_c) to yield strength of the confinement reinforcement (f_{yt}). Former research shows that formulation of transversal reinforcement which based on ACI 318 (2011) do not include the effect of axial load and deformation parameter. The formulation does not show same performance with variation of axial load. Besides, the transversal formulation does not accommodate the effect of high strength concrete and high strength steel.

This research discusses the role of transverse reinforcement as seismic reinforced concrete columns confinement which in this case is the transversal reinforcement formulation on SNI 2847 (2013). The latest confinement design addressed for columns remains standing under certain level of axial compression and displacement demands. However, this purpose did not consider shear effect. An approach formulation to determine the amount of confinement for reinforcement concrete that account effect of shear is provided. This method is based on combined effects of axial and shear stress that found in coulomb failure criterion. The proposed formulations are tested in 163 column test result data base and compared with several building codes. The result showed that the formulation can reduce amount of confinement safely for most columns.

Keywords: confinements, coulomb criterion, reinforced concrete columns

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Ruang lingkup	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Daktilitas dan Tulangan Transversal	7
2.2 Gaya Pengekangan Pada Tulangan Transversal.....	8
2.3 Model Pengekangan Pada Tulangan Transversal.....	12
2.3.1. Mander et al Tahun 1988	13
2.3.2. Legeron dan Paultre Tahun 2003.....	15
2.4 Formulasi kebutuhan tulangan transversal	18
2.5 Daktilitas dan Beban Aksial	22
BAB 3 METODE PENELITIAN	25
3.1 Bagan Alir Penelitian	25
3.2 Studi Literatur.....	27
3.3 Data dan Kriteria Hasil Eksperimental Kolom.....	27
3.4 Perbandingan Building Code.....	28
3.5 Verifikasi	30
3.6 Hasil Kesimpulan Penelitian	32
BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Umum.....	33
4.2 Faktor yang mempengaruhi drift ratio.....	33
4.3 Nilai k_1 Usulan Formulasi tulangan transversal	36
4.4 Perbandingan kebutuhan sengkang terhadap rasio beban aksial	38

4.5	Perbandingan kinerja model pengeangan	40
4.6	Perbandingan nilai A, B, dan C	46
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	49
5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kegagalan struktur akibat kurangnya pendetailan pada kolom	2
Gambar 2.1 Tegangan pengekangan untuk beberapa tipe tulangan transversal	9
Gambar 2.2 Pengekangan efektif inti beton dari tulangan transversal pada kolom bulat (Watson et al. 1994)	11
Gambar 2.3 Pengekangan inti kolom persegi dengan tulangan transversal (Watson et al. 1994).....	11
Gambar 2.4 Usulan model tegangan-regangan tekan beton terkekang (Mander et al 1988)	13
Gambar 2.5 Penentuan kuat kekang untuk tegangan pengekangan pada penampang persegi (Mander et al. 1988).....	15
Gambar 2.6 Hubungan tegangan-regangan beton terkekang (Cusson and Paultre 1995)	16
Gambar 2. 7 Kriteria Coulomb	19
Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian	26
Gambar 3.2 Tipe pengekangan persegi PEER Structural Performance Database (Berry et al, 2004)	28
Gambar 3.3 Pembagian kuadrant <i>scatter plot</i>	30
Gambar 4. 1 Grafik rasio beban aksial vs drift rasio	33
Gambar 4. 2 Grafik A_g/A_{ch} vs drift rasio	34
Gambar 4. 3 Grafik Area transversal vs Drift rasio	35
Gambar 4. 4 Grafik Area longitudinal vs Drift rasio	35
Gambar 4. 5 Grafik f_c/f_{yt} vs drift rasio	36
Gambar 4. 6 Grafik nilai k_1 vs drift dan nilai k_1 vs γ/λ	37
Gambar 4. 7 Perbandingan kebutuhan tulangan pengekangan vs rasio beban aksial	39
Gambar 4. 8 Drift rasio vs Ash provided/Ash ACI 318 2011 dan Drift rasio vs Ash provided/Ash SNI 2847 2013	40
Gambar 4. 9 Drift rasio vs Ash provided/Ash Elwood dan Drift rasio vs Ash provided/Ash ACI 318 2014	41

Gambar 4. 10 Drift rasio vs Ash provided/Ash ITG 4.3R dan Drift rasio vs Ash provided/Ash CSA A23.3	41
Gambar 4. 11 Drift rasio vs Ash provided/Ash NZS 3101 dan Drift rasio vs Ash provided/Ash Proposed 2	42
Gambar 4. 12 Drift rasio vs Ash provided/Ash Proposed 1.....	42

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Persamaan kebutuhan tulangan pengekangan untuk kolom persegi beton bertulang	Error! Bookmark not defined.
Tabel 2.2 Rentang parameter dari PEER Column Database	Error! Bookmark not defined.
Tabel 3.1 Rentang parameter dari PEER Column Database (Reiderer, 2003)	27
Tabel 3.2 Persamaan kebutuhan tulangan pengekangan untuk kolom persegi beton bertulang	29
Tabel 4. 1 Perhitungan jumlah kuadran	46
Tabel 4. 2 Perhitungan nilai A, B dan C	47

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

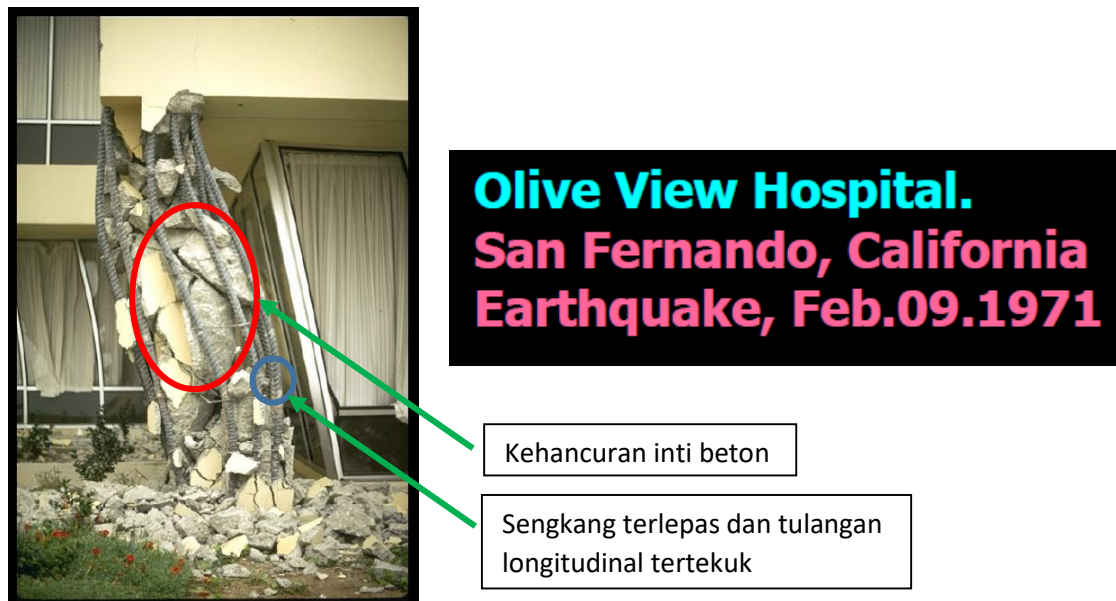
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia bersama dengan Jepang dan Amerika Serikat termasuk dalam wilayah yang sangat rawan bencana gempa bumi. Indonesia merupakan daerah yang memiliki resiko gempa yang tinggi hal ini dikarenakan Indonesia terletak diantara jalur pertemuan antara tiga lempeng tektonik yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng pasifik. Indonesia menjadi wilayah yang rawan gempa bumi akibat interaksi lempengan-lempengan ini. Irsyam dan kawan-kawan (2010) mengatakan bahwa dengan kondisi daerah seperti ini maka Indonesia sudah sering mengalami kejadian gempa bumi yang merugikan seperti rusaknya infrastruktur, kerugian ekonomi, bahkan merenggut ribuan nyawa seperti gempa Aceh tahun 2004, gempa jogja tahun 2006, gempa Padang tahun 2009.

Di Indonesia, SNI 2847 (2013) merupakan peraturan desain gedung beton bertulang yang telah menetapkan hal-hal penting seperti detail penulangan, persyaratan kekuatan dan kemampuan layan, prinsip dan persyaratan umum elemen bangunan dan lain sebagainya. Juga perlu diketahui bahwa SNI 2847 (2013) merupakan revisi dari SK SNI 03-2847-1992 tentang tata cara penghitungan struktur beton untuk bangunan gedung. SNI 2847 (2013) juga mengacu pada ACI 318 (2011) tentang *Building code requirements for structural concrete* dimana terdapat modifikasi yang dilakukan untuk penyesuaian dengan kondisi di Indonesia.

Berdasarkan studi lapangan kemudian ditemukan bahwa pendetailan struktur beton bertulang khususnya pada kolom tidak memenuhi persyaratan minimum untuk bangunan tahan gempa. Berikut contoh kegagalan struktur kolom yang dapat diamati.



Gambar 1.1 Kegagalan struktur akibat kurangnya pendetailan pada kolom

Kerusakan struktur pada gambar diatas terjadi pada salah satu kolom rumah sakit Oliver View, selatan California yang terkena gempa 6.7 skala richter. Rumah sakit Oliver View mengalami beberapa kerusakan pada gedungnya. Pada gambar diatas, dapat dilihat bahwa tidak terdapat sengkang yang mengikat kolom setelah terjadi gempa hal ini juga mengakibatkan kehancuran inti beton yang sangat dihindari efek lainnya yang terjadi adalah terjadi tekuk pada tulangan longitudinal kolom beton.

Dari gambar diatas menunjukkan bahwa struktur kolom tidak memenuhi persyaratan penulangan minimum seperti pada SNI 2847 (2013). Persyaratan yang tidak dipenuhi diantaranya adalah jarak yang terlalu jauh dan juga jumlah penulangan transversal dimana SNI 2847 (2013) mensyaratkan spasi vertikan tidak melebihi 16 kali diameter batang tulangan longitudinal, 48 kali diameter batang tulangan atau kawat pengikat, atau ukuran terkecil komponen struktur tekan. Penggunaan tulangan polos tanpa ulir pada tulangan transversal dan longitudinal juga bukan merupakan hal yang baik. Penggunaan tulangan polos pada kolom sebagai tulangan longitudinal dapat menyebabkan kolom mengalami retak vertical yang menyebabkan kegagalan belah (*split failure*) (Pham dan Li, 2014).

Akibat jumlah tulangan transversal yang tidak memenuhi dan jarak spasi tulangan transversal yang jauh maka hal ini dapat berakibat pada dua hal berikut.

Pertama adalah kolom dapat mengalami kegagalan geser atau getas tiba-tiba. Nawy (2005) menyatakan bahwa kegagalan terhadap geser sangatlah berbeda, kegagalan dapat terjadi secara mendadak tanpa peringatan cukup terlebih dahulu. Kedua adalah dapat terjadi kegagalan tekuk pada kolom jika kolom menderita tekanan aksial yang tinggi dan gaya dinamis oleh gempa. Pada tipe kegagalan seperti diatas terjadi kegagalan geser premature dimana tulangan kolom longitudinal dan transversal tidak mengalami kelelahan. Hal ini dapat dihindari dengan mengikuti pedoman SNI 2847 (2013).

Tulangan transversal pada kolom memiliki fungsi yang sangat penting dan hal ini sangat berguna ketika kolom terkena gempa. Fungsi-fungsi penting tersebut dapat diuraikan sebagai berikut:

- Menahan gaya geser

Tulangan transversal akan berfungsi sebagai komponen yang menahan Tarik ketika sudah terjadi retak geser diagonal.

- Menahan tekukan pada tulangan longitudinal

Tulangan transversal akan menahan atau mengikat tulangan longitudinal kolom sehingga ketika terjadi *spalling* maka tulangan longitudinal tidak tertekuk.

- Menyediakan pengekanan pada inti kolom

Tulangan transversal akan menyediakan suatu pengekanan pada inti kolom beton bertulang yang mengalami tekan jika berada pada bentuk pengikat tertutup. Setelah *spalling*, kekangan tulangan transversal melindungi inti beton sehingga tidak hancur.

Fungsi tulangan transversal pada umumnya untuk memastikan bahwa kolom memiliki kapasitas tahanan vertikal dan horizontal setelah leleh (contoh akibat gempa bumi) yang sama dengan kondisi sebelum leleh (kondisi awal) yang mana hal ini berarti bahwa fungsi tulangan transversal baru dapat terlihat setelah terjadi retak atau *spalling*.

Tulangan sengkang bertujuan agar kuat tekan kolom beton tekekang setelah mengalami *spalling* tetap sama dengan sebelum mengalami *spalling*. Akan tetapi pada SNI 2847 (2013) perhitungan kebutuhan tulangan pengekanan hanya merupakan rasio dari luas penampang kolom terhadap luas inti kolom beton yang

terkekang dan rasio kuat tekan (f_c') terhadap kuat leleh tulangan (f_y) serta hanya diavalidasi terhadap kolom dengan mutu beton normal. Persamaan tersebut merupakan hasil penelitian dari Richart et al tahun 1928.

Kajian terhadap kebutuhan tulangan pengekangan ACI 318 (2011) dan SNI 2847 (2013) dilakukan oleh beberapa peneliti seperti Paulay and Priestley (1992), Razvi and Saatcioglu (1994), Watson et al. (1994), Bayrak and Sheikh (1998), Saatcioglu and Razvi (2002), Li and Park (2004), Paultre and Légeron (2008), Elwood et al. (2009), Hwang et al. (2013). Beberapa hal yang dikaji diantaranya adalah:

- Efek aksial tekan tidak disertakan dalam perhitungan kebutuhan tulangan pengekangan ACI 318 (2011) dan SNI 2847 (2013) hal ini penting menentukan daktilitas kolom.
- Efek dari beton mutu tinggi (*high-strength concrete*), beton mutu sangat tinggi (*very high-strength concrete*), dan tulangan mutu tinggi (*high-strength steel*) juga tidak disertakan dalam perhitungan kebutuhan tulangan pengekangan ACI 318 (2011) dan SNI 2847 (2013).
- Target perpindahan (*displacement demand*) berupa rasio *drift* dan daktilitas kurvatur juga disertakan.

Pada penelitian ini akan meneliti perhitungan kebutuhan tulangan pengekangan SNI 2847 (2013) dan ACI 318 (2011) dan akan dievaluasi dengan beberapa standar perencanaan seperti CSA A23.3-04(2004), NZS 3101 (2006), ITG 4.3R-07(2007), ACI 318 (2014) dan usulan beberapa peneliti. Data base hasil eksperimental kolom beton bertulang oleh Berry et al. 2004 akan digunakan untuk mengevaluasi keandalan perhitungan kebutuhan tulangan pengekangan SNI 2847 (2013) / ACI 318 (2011).

1.2 Permasalahan

Dalam penelitian ini permasalahan utama yang akan dibahas adalah evaluasi kebutuhan tulangan pengekangan (*confinement reinforcement*) dalam SNI 2847 (2013) dan bentuk usulan perencanaan kebutuhan tulangan pengekangan. Tujuan khusus dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Menentukan parameter apa saja yang mempengaruhi kebutuhan tulangan pengekangan.
2. Mengusulkan perumusan kebutuhan tulangan pengekangan dan mengevaluasi usulan rumusan tersebut dengan database experimental kolom beton bertulang
3. Membandingkan usulan perumusan tulangan pengekangan dengan SNI 2847 (2013) dan peraturan bangunan (*building codes*) yang lain berdasarkan parameter yang telah ditentukan dengan database hasil experimental kolom beton bertulang.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan evaluasi perhitungan kebutuhan tulangan pengekangan dari SNI 2847 (2013) dan memberikan alternatif usulan perhitungan kebutuhan tulangan pengekangan. Sedangkan untuk tujuan penelitiannya secara khusus adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan parameter-parameter yang mempengaruhi pengekangan pada kolom beton bertulang.
2. Mendapatkan perumusan kebutuhan tulangan pengekangan dan mengevaluasi usulan rumusan tersebut dengan database experimental kolom beton bertulang
3. Mendapatkan hasil perbandingan usulan perumusan tulangan pengekangan dengan SNI 2847 (2013) dan peraturan bangunan (*building codes*) yang lain berdasarkan parameter yang telah ditentukan dengan database hasil experimental kolom beton bertulang.

1.4 Ruang lingkup

Penelitian yang dilakukan diberi batasan-batasan sebagai berikut:

1. Penampang kolom yang dievaluasi hanya meliputi penampang persegi.
2. Perbandingan performa terhadap building code SNI 2847 2013, ACI 318 2011, ACI 318 2014, CSA A23.3, NZS 3101, ITG 4.3R dan Elwood.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui perilaku kolom yang tulangan pengekangannya didesain dengan SNI 2847(2013).
2. Manfaat alternatif usulan tulangan pengekangan kolom beton bertulang dapat digunakan dalam perencanaan gedung beton bertulang baik untuk gedung bertingkat rendah hingga bertingkat tinggi.
3. Alternatif usulan tulangan pengekangan kolom beton bertulang dapat digunakan untuk material beton dengan kuat tekan normal (*normal-strength concrete*) dan kuat tekan tinggi (*high-strength concrete*) dengan tulangan mutu tinggi (*high-strength steel*)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daktilitas dan Tulangan Transversal

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa tulangan transversal pada kolom mempunyai tiga peran utama yaitu sebagai tulangan geser, menahan tekuk tulangan longitudinal saat mengalami tekan, dan mengekang inti beto pada kolom. Pada penelitian ini, tidak semua fungsi dari tulangan transversal ini yang akan menjadi parameter topik penelitian. Oleh karena itu akan ditinjau masing-masing fungsinya untuk menentukan parameter apa yang akan dipakai. Pertama adalah fungsi tulangan geser sebagai tulangan geser dimana diketahui bahwa tulangan geser akan menahan sebagian besar gaya geser yang terjadi saat desain yang dihitung menggunakan metode *truss mechanism*. Metode ini menghitung kontribusi ketahanan gaya geser yang diberikan oleh tulangan transversal dan pada penelitian ini fungsi tulangan sebagai penahan gaya geser tidak akan dibahas.

Kedua fungsi tulangan transversal sebagai penahan tekuk tulangan longitudinal dimana ketika terdapat tulangan transversal pada titik-titik sendi plastis akan sangat membantu ketahanan kolom yang mana jika terjadi tekuk pada tulangan longitudinal saat gempa akan sangat mempengaruhi fungsinya. Fungsi tulangan transversal ini merupakan salah satu parameter yang penting dalam desain kolom bertulang. Akan tetapi pada penelitian kali ini tidak akan dibahas mengenai desain tulangan lateral sebagai penahan tekuk tulangan longitudinal.

Ketiga adalah fungsi tulangan transversal sebagai pengekan inti beton. Fungsi tulangan transversal ini yang menjadi fokus penelitian ini. Dimana diharapkan kolom beton bertulang khususnya pada saat setelah mengalami gempa masih utuh maksudnya adalah inti kolom tidak hancur sehingga fungsinya masih dapat dipenuhi. Tentunya factor-faktor seperti luas penampang, spasi tulangan dan orientasi dari tulangan lateral merupakan factor penting untuk mencapai fungsi ini. Terdapat korelasi yang perlu diperhatikan antara daktilitas kolom beton bertulang dan gaya pengekan yang diberikan oleh tulangan transversal.

2.2 Gaya Pengekangan Pada Tulangan Transversal

Untuk penelitian ini, memerlukan pemahaman mengenai mekanisme tulangan transversal mengekang into beton pada kolom. Penelitian mengenai mekanisme pengkangan yang diberikan pada tulangan telah dilakukan oleh Mander et al. (1988). Penelitian ini pertama kali bertujuan untuk mengajukan model teoritis dari tegangan-regangan pada beton bertulang. Model ini digunakan untuk beton yang dibebani beban tekan uniaksial yang dikekang oleh tulangan transversal yang tidak dibatasi model pengekangannya (pengekangan spiral, pengekangan persegi dengan dan tanpa tambahan pengikat silang).

Pengajuan model perhitungan dengan berdasarkan pada kesetimbangan energy dimana dalam hal ini kapasitas energy regangan tulangan transversal sama dengan energy regangan yang ada pada beton sebagai akibat pengekangan. Model yang diajukan juga dapat mengakomodasi beban siklik dan efek regangan. Konsep pengajuan perhitungan. Dari perhitungan teoritis ini kemudian mendapat beberapa factor-faktor penting untuk menentukan kekuatan pengekangan.

Dari percobaan yang dilakukan, Mander et al. (1998) menyimpulkan bahwa luas efektif beton yang terkekang lebih kecil dari pada luas penampang yang dikelilingi tulangan transversal atau $A_e < A_{ch}$ dimana A_e adalah luas efektif beton terkekang sedangkan A_{ch} merupakan luas area beton yang dikelilingi tulangan transversal. Juga dapat disimpulkan bahwa tingkat keefektifan pengekangan juga dipengaruhi oleh distribusi, konfigurasi, dan spasi tulangan longitudinal. Ternyata fakto-faktor tulangan longitudinal ini cukup penting sehingga perlu untuk memperhitungkan efek ini lalu kemudian diusulkan tekanan lateral efektif pengekangan f'_l dengan formulasi sebagai berikut:

$$f'_l = f_l k_e \quad (1)$$

Dimana : k_e = koefisien tingkat keefektifan pengekangan

f'_l = tekanan lateral efektif

f_l = tekanan lateral

Nilai k_e memiliki formulasi :

$$k_e = \frac{A_c}{A_{cc}} \quad (2)$$

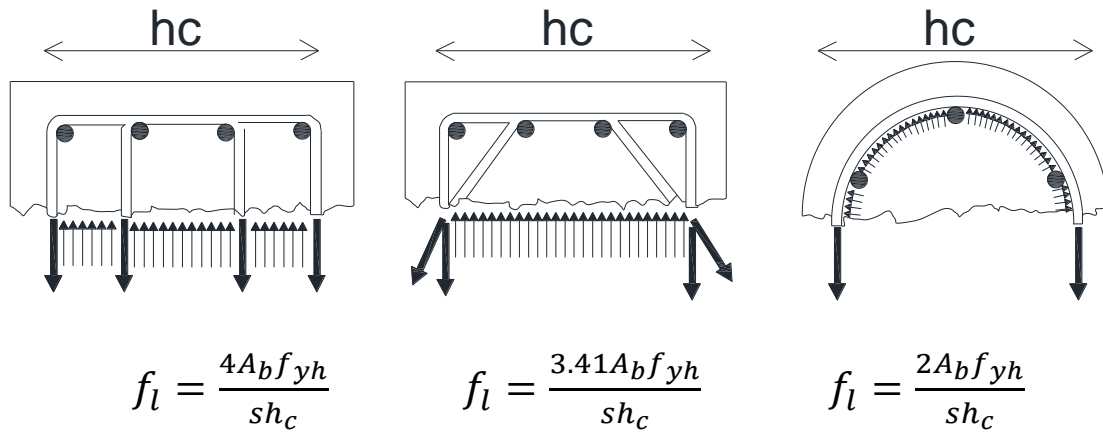
Dimana : A_{cc} = area dari inti kolom dimana dibatasi oleh garis tengah penulangan spiral atau hoop dan dikurangi luasan tulangan longitudinal yang dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$A_{cc} = A_c(1 - \rho_{cc}) \quad (3)$$

Dimana : ρ_{cc} = rasio tulangan longitudinal terhadap luas penampang inti kolom

A_c = area kolom

Parameter f_l adalah tekanan lateral dari tulangan transversal dimana koefisien dari tulangan transversal untuk f_l dapat dihitung seperti pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 2.1 Tegangan pengekanan untuk beberapa tipe tulangan transversal

Dimana : A_b = Luas tulangan transversal

f_{yh} = kuat leleh tulangan transversal

s = spasi tulangan transversal

h_c = dimensi inti kolom

Dari rumusan diatas tentunya dapat diketahui bahwa untuk masing-masing tipe kekangan memiliki formulasinya sendiri-sendiri termasuk formulasi untuk koefisien tingkat keefektifan pengekanan (k_e). Berikut adalah formulasi nilai k_e untuk lingkaran

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_{cc}} \quad (4)$$

Sedangkan untuk tipe kekangan spiral menggunakan formulasi berikut

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (5)$$

Dimana : s' = jarak bersih antar sengkang

d_s = dimensi inti kolom diukur dari tepi luar tulangan
sengkang

Tegangan pengekan lateral diasumsikan pada separuh badan inti kolom terkekang dengan tulangan lateral sehingga didapat kesetimbangan gaya untuk kolom bulat adalah:

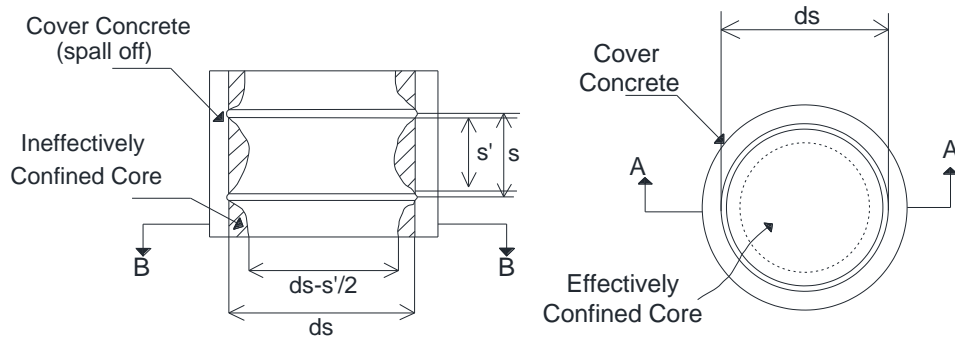
$$f_l = \frac{2A_b f_{yh}}{sh_c} \quad (6)$$

dari persamaan (1) dan (6) maka dapat diformulasikan tegangan efektif lateral yang dapat diberikan oleh kolom bulat sebagai berikut:

$$f'_l = \frac{1}{2} \rho_s k_e f_{yh} \quad (7)$$

Dimana: ρ_s = rasio volumetric tulangan transversal

nilai k_e seperti pada persamaan (4) dan persamaan (5). Variable-variabel dari formulasi diatas dapat dipahami dengan lebih jelas pada gambar 4 berikut:

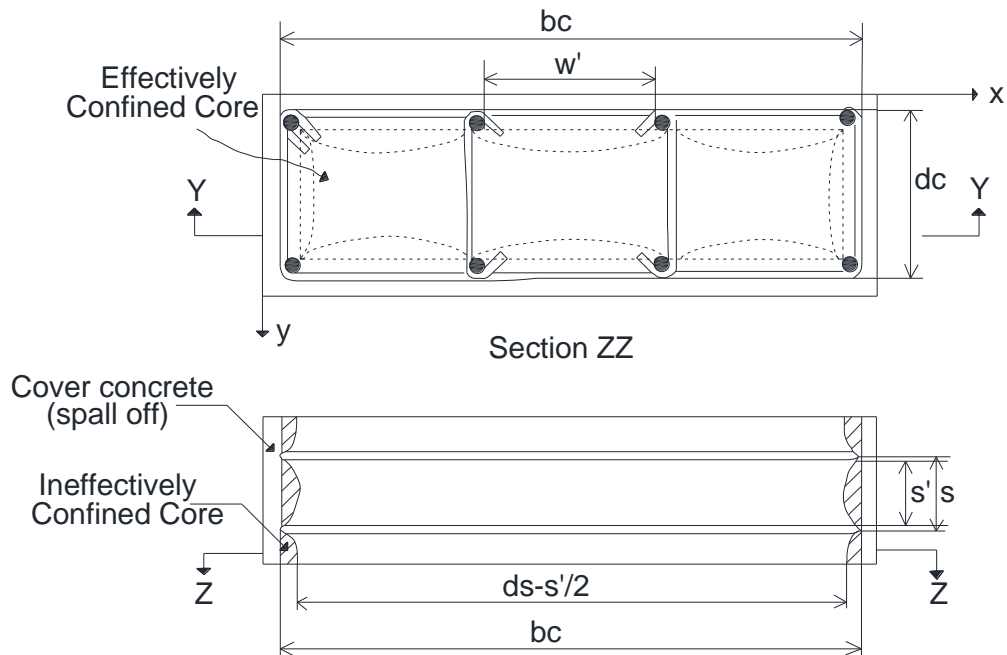


Gambar 2.2 Pengekangan efektif inti beton dari tulangan transversal pada kolom bulat (Watson et al. 1994)

Dengan cara yang sama untuk penampang kolom persegi juga dapat diformulasikan dengan formula dasar adalah persamaan (2) maka didapatkan nilai k_e sesuai formulasi berikut ini

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (8)$$

Dimana: w'_i = jarak bersih antar tulangan longitudinal sepanjang dimensi s' , b_c , dan d_c seperti yang ditunjukkan pada gambar 4 berikut ini :



Gambar 2.3 Pengekangan inti kolom persegi dengan tulangan transversal (Watson et al. 1994)

Seperti diketahui bahwa terdapat tulangan arah x dan arah y yang berbeda pada beberapa kasus sehingga rasio tulangan transversal untuk arah x dan arah y dapat diformulasikan dalam persamaan berikut :

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{s d_c} \quad (9)$$

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{s h_c} \quad (10)$$

Dimana: ρ_x & ρ_y = rasio tulangan arah x dan arah y

A_{sx} & A_{sy} = luas area tulangan arah x dan arah y

Persamaan (9) dan (10) kemudian dimasukkan kedalam persamaan (1) dengan nilai k_e didapatkan dari persamaan (8) lalu kemudian didapatkan tegangan efektif pengekang lateral untuk penampang kolom persegi pada arah x dan arah y sebagai berikut :

$$f'_{lx} = \rho_x k_e f_{yh} \quad (11)$$

$$f'_{ly} = \rho_y k_e f_{yh} \quad (12)$$

Dari penjabaran formulasi-formulasi diatas memberikan gambaran mengenai parameter-parameter apa saja yang harus diperhatikan untuk persyaratan kebutuhan tulangan pengekangan dimana persyaratan-persyaratan tersebut diantaranya adalah luas tulangan transversal, spasi tulangan transversal, dimensi inti beton pada kolom, rasio tulangan longitudinal, dan spasi tulangan longitudinal (khusus kolom persegi).

2.3 Model Pengekangan Pada Tulangan Transversal

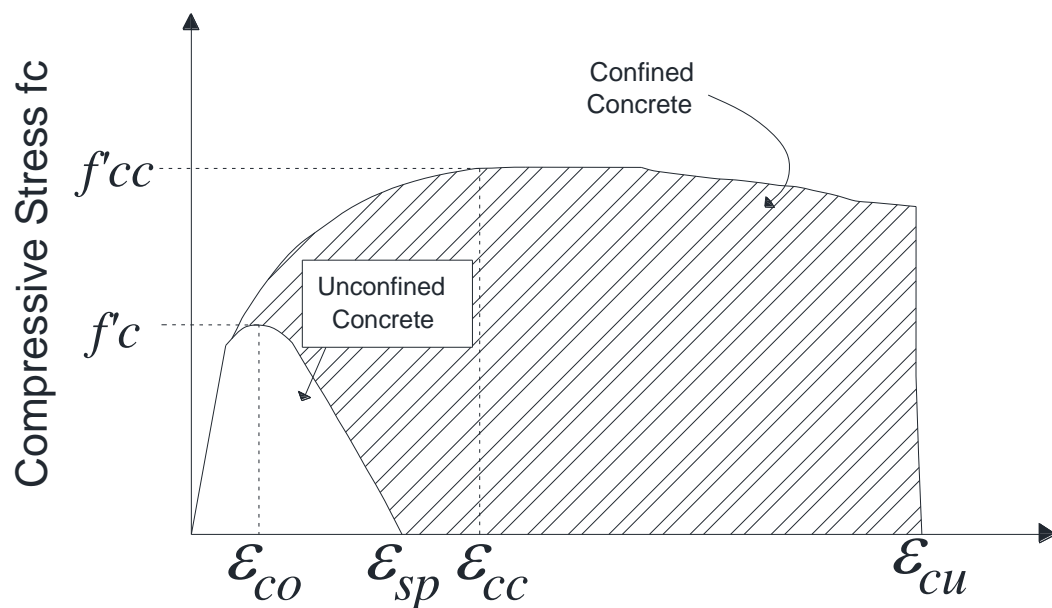
Melalui pembahasan sebelumnya sekarang telah diketahui hubungan antara tulangan transversal dan pengekangan beton. Kemudian untuk memperhitungkan efek gempa atau kondisi setelah elastis diperlukan sebuah alat bantu untuk memperkirakan kekuatan dari beto bersengkang ini. Alat bantu yang dimaksud dalam hal ini adalah grafik perilaku tegangan-regangan beton.

Karena pentingnya perilaku tegangan-regangan beton ini maka banyak para peneliti yang mempelajari dan berusaha menghasilkan perilaku tegangan-regangan

beton yang paling akurat atau mendekati kondisi nyatanya. Hal ini diawali oleh penelitian Richart et al (1928) yang mempelajari kekuatan dan regangan longitudinal pada beton yang dikekang dengan sebuah tegangan hidrostatik aktif. Sejak saat itu, banyak usulan persamaan matematis untuk memprediksi hubungan tegangan-regangan dari beton terkekang ini. Berikut akan dibahas mengenai model-model untuk memprediksi tegangan beton terkekang.

2.3.1. Mander et al Tahun 1988

Berdasarkan pada penelitian dari Richard et al. (1928) menginspirasi Mander dkk untuk membuat pendekatan tegangan-regangan beton terkekang sehingga dihasilkan lah grafik tegangan-regangan berikut:



Gambar 2.4 Usulan model tegangan-regangan tekan beton terkekang (Mander et al 1988)

Perlu diketahui bahwa pendekatan diatas dapat diaplikasikan pada kolom dengan pengekanan persegi atau kekangan bulat. Para peneliti tersebut kemudian mengusulkan tegangan tekan longitudinal beton f_c melalui formulasi berikut :

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r-1+x} \quad (13)$$

Dengan :

$$\chi = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (14)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (15)$$

Sedangkan :

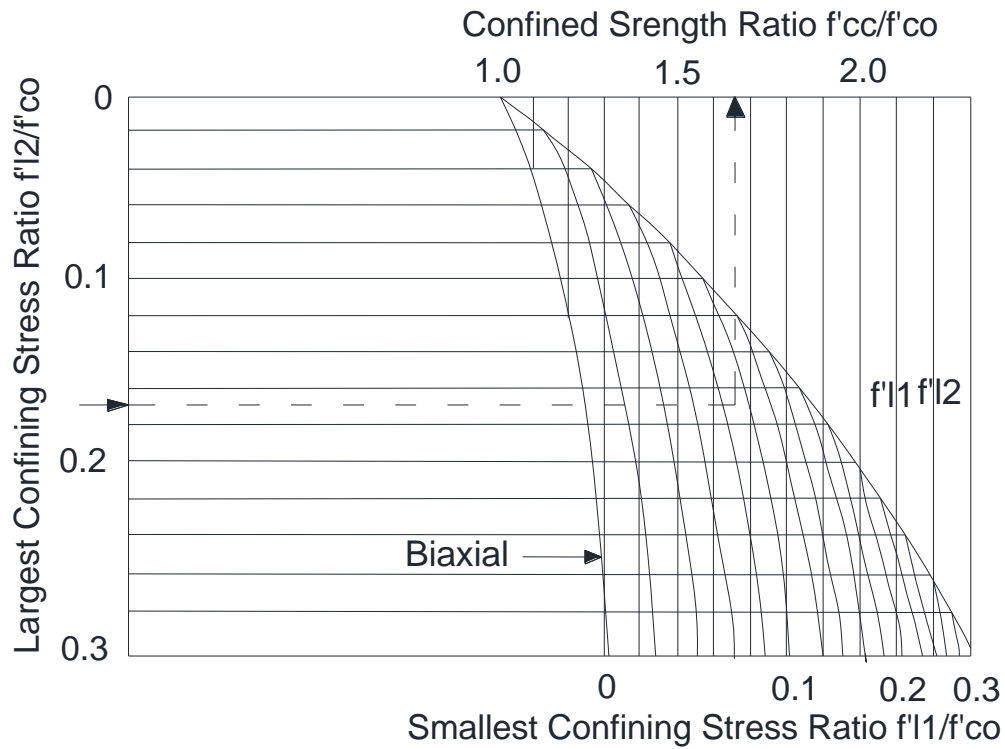
$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (16)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_{co}} (mpa) \quad (17)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} (Mpa) \quad (18)$$

Dimana: f'_c	= tegangan tekan dari beton pengekan
f'_{cc}	= tegangan tekan dari inti beton pengekan
ε_c	= rengangan longitudinal pada tegangan beton
ε_{cc}	= rengangan longitudinal pada inti beton
f'_{co}	= tegangan beton normal
ε_{co}	= tegangan saat tegangan beton normal mencapai maksimum, umumnya diasumsikan 0.002
E_c dan E_{sec}	= tangen modulus elastisitas dari beton

Pada formula diatas terdapat variabel f'_{cc} yang merupakan tegangan beton yang terkekang dimana variabel ini dapat ditentukan dengan menggunakan model konstitutif berdasarkan tes tekan tri-aksial seperti pada gambar 6 berikut (untuk sengkang persegi):



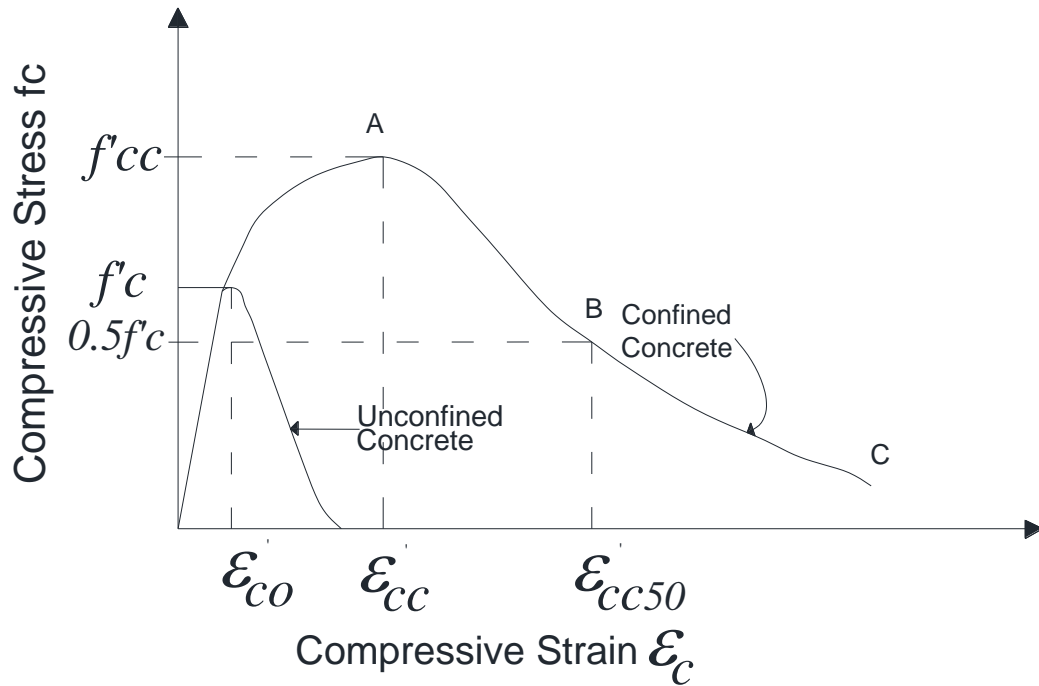
Gambar 2.5 Penentuan kuat kekang untuk tegangan pengekanan pada penampang persegi (Mander et al. 1988)

Dimana untuk kasus dimana inti beton pada kolom terkena tegangan kekangan lateral yang setara tegangan tekan ($f'_{l1} = f'_{l2}$) maka tegangan tekan yang didapat adalah sebagai berikut:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (19)$$

2.3.2. Legeron dan Paultre Tahun 2003

Setelah model tegangan-regangan yang diusulkan oleh Mander dkk kemudian muncul banyak model tegangan-regangan yang dikemukakan salah satunya oleh Lageron dan Patrick Paultre (2003) yang merupakan pengembangan dari model Cusson dan Paultre (1995) yang kemudian dikembangkan untuk beton mutu tinggi. Model ini berdasarkan pada kesetimbangan regangan dan gaya transfersal. Model tegangan-regangan dari Lageron dan Paultre (2003) dapat dilihat pada gambar 9 berikut ini:



Gambar 2.6 Hubungan tegangan-regangan beton terkekang (Cusson and Paultre 1995)

Gambar pada kurva diatas dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada kurva terdapat dua titik utama yaitu titik A dan titik B yang membagi kurva menjadi dua fase yaitu dari fase 0 ke titik A dan dari titik A ke titik B. Titik A merupakan kuat tekan beton yang terkekang f'_{cc} yang berhubungan dengan regangan ϵ'_{cc} dan titik B merupakan regangan aksial setelah puncak. ϵ'_{cc50} merupakan regangan beton pada saat kapasitasnya mencapai 50% dari kuat beton tertekan. Untuk fase 1 (dari titik 0 ke titik A), hubungan tegangan-regangan(f_{cc} - ϵ'_{cc}) dapat dihitung menurut formulasi berikut :

$$f_{cc} = f'_{cc} \left(\frac{k(\epsilon_{cc}/\epsilon'_{cc})}{k-1+(\epsilon_{cc}/\epsilon'_{cc})^k} \right), \epsilon_{cc} \leq \epsilon'_{cc} \quad (20)$$

Sedangkan

$$k = \frac{E_{ct}}{E_{ct} - (f'_{cc}/\epsilon'_{cc})} \quad (21)$$

Dimana : k = parameter control kemiringan kurva

E_{ct} = tangen modulus elastisitas dari beton yang tidak terkekang

Untuk fase II (kondisi setelah titik A) yaitu bagian kurva setelah mengalami tegangan maksimum dapat dihitung nilai f_{cc} sebagai berikut :

$$f_{cc} = f'_{cc} \exp[k_1(\varepsilon_{cc} - \varepsilon'_{cc})^{k_2}], \varepsilon_{cc} \geq \varepsilon'_{cc} \quad (22)$$

Dengan

$$k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\varepsilon'_{cc50} - \varepsilon'_{cc})^{k_2}} \quad (23)$$

$$k_2 = 1 + 25(I_{e50})^2 \quad (24)$$

Dimana: I_{e50} = efektif confinement index yang dievaluasi pada saat regangan mencapai kondisi ε'_{cc50}

ε'_{cc50} = regangan beton pada saat kapasitasnya mencapai 50% dari kuat beton tertekan

Lageron dan Patrick Paultre (2003) mengembangkan formula f'_{cc} dan ε'_{cc} dengan menggunakan efektif confinement index pada saat tegangan puncak, yang merupakan parameter nondimensi yang dikenalkan oleh Cusson dan Paultre (1995).

$$I'_e = \frac{f'_{le}}{f'_c} \quad (25)$$

$$f'_{le} = K_e \frac{A_{sh}}{s_c} f'_h \quad (26)$$

Sehingga persamaan selanjutnya didiskripsikan sebagai berikut:

$$f'_{cc} = f'_c [1 + 2.4(I'_e)^{0.7}] \quad (27)$$

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c [1 + 3.5(I'_e)^{1.3}] \quad (28)$$

Pada penelitian ini juga mengasumsikan bahwa tegangan kekangan yang diberikan oleh tulangan transversal tidak selalu mencapai batas leleh dimana hal ini khususnya terjadi pada kolom dengan jumlah tulangan yang kecil atau menggunakan tulangan mutu tinggi. Untuk mengikut sertakan variabel ini maka Lageron dan Paultre memperkenalkan parameter sebagai berikut :

$$k = \frac{f'_c}{\rho_{sey} E_s \epsilon'_c} \quad (29)$$

Sedangkan definisi tegangan maksimum f'_h pada tulangan confinement adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} f'_h &= f_{hy} && \text{untuk nilai } k \leq 10 \\ f'_h &= \frac{0.25 f'_c}{\rho_{sey}(k-10)} \geq 0.43 E_s \epsilon'_c && \text{untuk nilai } k > 10 \end{aligned} \quad (30)$$

Regangan setelah puncak ϵ'_{cc50} diambil dari kurva ketika tegangan mencapai 50% dari tegangan maksimum dimana persamaan ini dapat diuraikan sebagai berikut :

$$\epsilon'_{cc50} = \epsilon'_{c50} (1 + 60 I_{e50}) \quad (31)$$

Sedangkan nilai

$$I_{e50} = \rho_{se} \frac{f_{hy}}{f'_c} \quad (32)$$

$$\rho_{se} = K_e \frac{A_{sh}}{s} \quad (33)$$

Dimana ϵ'_{c50} = regangan pada saat tegangan beton tidak terkekang mencapai tegangan $0.5 f'_c$

I_{e50} = indeks confinement pada saat ϵ'_{cc50}

f_{hy} = kuat leleh dari tulangan transversal

ρ_{se} = rasio volumetric dari tulangan kekangan

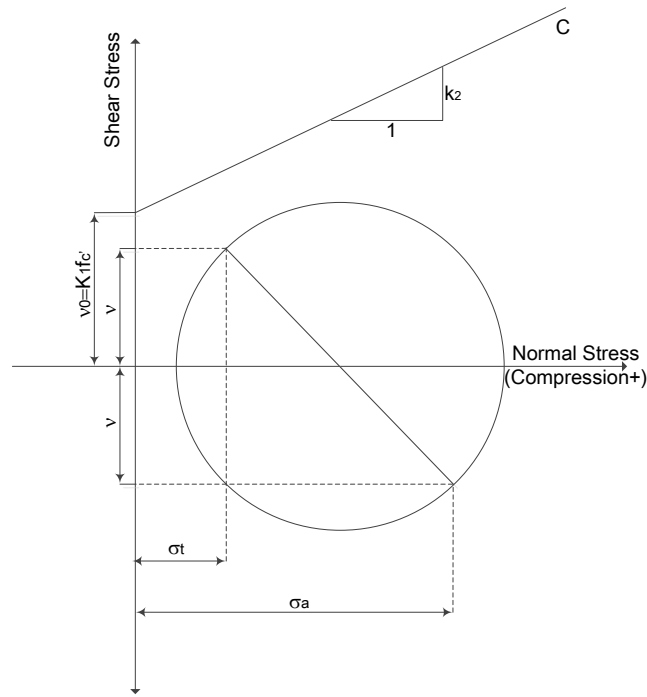
A_{sh} = luas total area tulangan transversal

S & c = dimensi inti kolom yang terkekang berdasarkan arah yang ditinjau

2.4 Formulasi kebutuhan tulangan transversal

Pujol et al (2000) mengusulkan formulasi kebutuhan tulangan transversal yang dimana pada metode ini memperhitungkan kebutuhan tulangan transversal berdasarkan kombinasi langsung antara tegangan normal dan tegangan geser.

Kondisi kegagalan dari material yang lemah terhadap tarik yang mengalami kombinasi tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) sangat tepat direpresentasikan dalam kriteria Coulomb yang dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 7 Kriteria Coulomb

Perlu diketahui bahwa lingkaran mohr pada gambar diatas mewakili kombinasi tegangan aksial dan tegangan geser. Lingkaran mohr juga mewakili keadaan kesetimbangan. Kegagalan material terjadi jika lingkaran mohr menyinggung atau melebihi garis C. Garis C dapat dideskripsikan sebagai :

$$v_u = v_0 + m\sigma \quad (34)$$

Dimana : v_u = unit kekuatan geser

v_0 = ordinate yang merepresentasikan kriteria Coulomb saat $\sigma = 0$

m = kemiringan garis yang merepresentasikan kriteria Coulomb

σ = unit tegangan yang bekerja tegak lurus bidang kegagalan.

Lingkaran Mohr merepresentasikan tegangan rata-rata pada inti kolom. Tegangan rata-rata ini berupa tegangan aksial yang dapat diformulasikan sebagai :

$$\sigma_a = \frac{P + T}{h_c b_c} \quad (35)$$

Sedangkan untuk tegangan geser dapat didekati dengan:

$$\tau = \frac{V}{h_c b_c} \quad (36)$$

Sedangkan tegangan yang terjadi pada tulangan transversal dihitung berdasarkan property tulangan transversal dengan formulasi :

$$\sigma_t = \frac{A_v f_{yt}}{h_c b_c} \quad (37)$$

Dimana:

- σ_a = rata-rata tegangan aksial pada inti
- P = beban aksial; T = gaya pada tulangan Tarik ($1/2 A_s f_y$)
- h_c = ketinggian inti beton
- b_c = lebar inti beton
- σ_t = rata-rata tegangan tulangan transversal
- A_v = luar area tulangan transversal
- F_{yt} = tegangan leleh dari tulangan transversal
- s = jarak tulangan transversal
- τ = rata-rata tegangan geser
- V = maksimum gaya geser.

Sangat sedikit informasi yang tersedia untuk menentukan konstanta pada persamaan (34) akan tetapi Penelitian oleh Richart et al (1929) mendefinisikan kriteria Coulumb relative berdasarkan hubungan kekuatan beton sebagai :

$$v_u = k_1 f'_c + k_2 \sigma \quad (38)$$

Dengan menggunakan data dari test pengekanan beton menggunakan tekanan hidrolik Richard et al (1929) menyimpulkan bahwa nilai $k_1 \approx 1/4$ dan $k_2 \approx 1/4$ (untuk beton berat normal yang dibebani secara meningkat dengan beban monotonic).

Pujol et al (2000) berhipotesa bahwa hanya nilai k_1 yang rentan untuk diganti karenan berhubungan dengan efek kumulatif dari retak mikro yang merupakan hasil antara jumlah interaksi dan drift dari loading cycle. Perlu dipahami bersama bahwa beban yang terjadi pada arah yang sama akan menghasilkan retak internal yang semakin banyak mengakibatkan pengurangan kekuatan. Oleh Karena itu reduksi nilai k_1 ditafsirkan berhubungan dengan displacement. Pujol et al (2000) menghubungkan nilai k_1 dengan γ/λ (γ = maksimum drift ratio pada pengurangan kekuatan 20% dari kekuatan lateral maksimum; λ = rasio rentang geser terhadap

tinggi efektif) yang dianggap cocok untuk normalisasi kapasitas drift dari beton bertulang yang dibebani geser siklik.

Kemudian Pujol et al (2000) mengusulkan formulasi nilai k_1 secara umum berdasarkan data penelitian terhadap 29 sampel kolom beton bertulang. Nilai k_1 ini kemudian digunakan formulasi kebutuhan tulangan transversal yang mana penurunan rumusnya dapat dijelaskan sebagai berikut.

Formulasi radius lingkaran Mohr (R) saat kegagalan dalam fungsi v_0 , σ_a , σ_t , dan $\phi = \tan^{-1}(m)$:

$$R = v_0 \cos \phi + \frac{1}{2}(\sigma_t + \sigma_a) \sin \phi \quad (39)$$

Formulasi radius lingkaran Mohr (R) saat kegagalan dalam fungsi v , σ_a , dan σ_t :

$$R = \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_a - \sigma_t)^2 + v^2} \quad (40)$$

Nilai k_1 dapat ditentukan dengan menyamakan persamaan (39) dan (40) serta mengganti $\phi = \tan^{-1}(3/4)$ dan $v_0 = k_1 f_c$ sehingga :

$$k_1 = \frac{-\frac{3}{10}(\sigma_a + \sigma_t) + \sqrt{\frac{(\sigma_a - \sigma_t)^2}{4} + v^2}}{\frac{4}{5}f_c'} \quad (41)$$

Nilai σ_t dapat ditentukan dengan menyamakan persamaan (39) dan (40) serta mengganti $\phi = \tan^{-1}(3/4)$:

$$\sigma_t = \frac{3}{2}v_0 + \frac{17}{8}\sigma_a \pm \frac{5}{8}\sqrt{[(4v_0 + 3\sigma_a)^2 - 16v^2]} \quad (42)$$

Dengan mengambil nilai minimum dari persamaan (42) dan dibagi dengan σ_a maka didapat :

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_a} = \frac{3}{2}\frac{v_0}{\sigma_a} + \frac{17}{8} - \frac{5}{8}\sqrt{\left[\left(4\frac{v_0}{\sigma_a} + 3\right)^2 - 16\frac{v^2}{\sigma_a^2}\right]} \quad (43)$$

Dengan: $\alpha = 4(v_0/\sigma_a) + 3$

$$\beta = 4(v/\sigma_a)$$

maka persamaan (43) dapat dituliskan sebagai :

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_a} = \frac{3}{2}\alpha + 1 - \frac{5}{8}\sqrt{\alpha^2 - \beta^2} \quad (44)$$

Dengan substitusi persamaan (37) kedalam persamaan (44) maka didapatkan rumusan kebutuhan tulangan transversal sebagai berikut :

$$\frac{A_{sh}}{sb_c} = \frac{3}{2}\alpha + 1 - \frac{5}{8}\sqrt{\alpha^2 - \beta^2} \frac{\sigma_a}{f_{yt}} \quad (45)$$

Dimana: A_{sh} = luas area tulangan transversal
 s = spasi antar tulangan transversal
 bc = dimensi inti kolom

Nilai k_1 yang didapatkan oleh Pujol et al (2000) berdasarkan data 29 kolom beton bertulang eksperimental adalah sebagai berikut :

$$k_1 = \frac{1}{7} \left(1 - \frac{100}{3} \frac{\gamma}{\lambda} \right) \geq 0 \quad (46)$$

Dimana: γ = maksimum drift ratio pada pengurangan kekuatan 20%
dari kekuatan lateral maksimum
 λ = rasio rentang geser terhadap tinggi efektif

2.5 Daktilitas dan Beban Aksial

Melalui riset yang berkelanjutan kemudian dapat dipahami bahwa terdapa hubungan antara daktilitas dan beban aksial dimana pengekanan dapat meningkatkan kapasitas regangan aksial secara signifikan. Peningkatan ini dapat berkisar antara 4 sampai dengan 16 kali regangan ultimate beton itu sendiri jika dibandingkan dengan kondisi beton tanpa kekangan (Paulay and Priestley, 1992). Ternyata kemudian disadari bahwa efek ini juga terjadi demikian pada beton mutu tinggi dimana terjadi peningkatan perilaku HSC (*high strength concrete*) yang menderita beban aksial konstan dan beban siklik lateral akibat adanya pengekanan. Kemudian didapatkan bahwa kolom HSC dapat dibuat memiliki sifat daktail jika berada dalam beban aksial tinggi dan menggunakan pengekanan yang cukup dan memiliki konfigurasi yang efektif (Bayrak and Sheikh, 1996).

Jika terjadi retak-retak pada daerah Tarik suatu elemen maka yang memikul semua gaya tariknya adalah tulangan Tarik sedangkan jika pada beton pada daerah tekan hanya menahan gaya tekan saja hal ini kurang lebih menjelaskan hubungan antara daktilitas dan beban aksial yang dimaksud. Juga dapat digambarkan curvature suatu penampang melalui formula berikut:

$$\phi \frac{\delta \theta}{\delta L} = \frac{\varepsilon_{comp}}{c} \quad (47)$$

Dimana: ϕ = kurvatur
 θ = sudut deformasi suatu elemen
 L = panjang suatu elemen
 ε_{comp} = regangan tekan
 c = tinggi daerah tekan.

Persamaan ini secara langsung menunjukkan bahwa semakin besar regangan ultimate yang dapat dicapai maka semakin tinggi pula kurvatur ultimitnya. Kenaikan tegangan tekan pada beton terkekang membutuhkan jumlah beton yang kecil untuk menyeimbangkan gaya pada penampang tarik, sehingga menyebabkan sumbu neutral axis berpindah lebih dekat ke sisi tekan dan meningkatkan kurvatur ultimate. Kapasitas kurvatur yang besar pada penampang beton juga berdampak pada deformasi lateral yang besar pula.

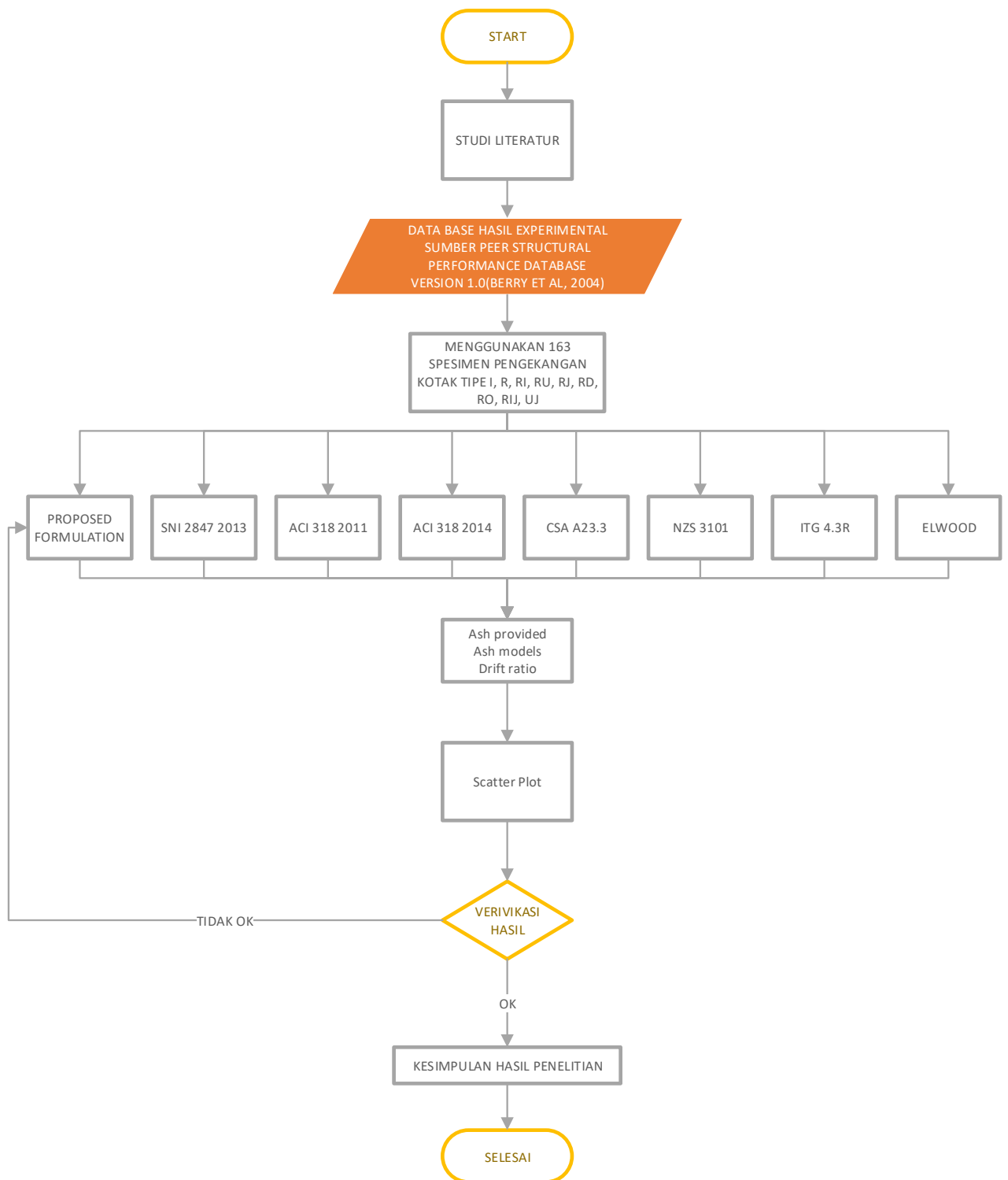
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Bagan Alir Penelitian

Diperlukan metode dan urutan kerja yang jelas dan sistematis untuk menyelesaikan penelitian ini yang diwakili oleh bagan alir. Bagan alir yang dihasilkan harus memenuhi kriteria berpikir logis dan kritis sehingga akan menghasilkan pengerjaan penelitian yang berjalan dengan baik dan efektif. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1. berikut ini:



Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian

3.2 Studi Literatur

Pada studi literature dilakukan pengumpulan referensi-referensi yang berkaitan dengan studi ini dimana dari referensi ini dapat menjadi materi untuk memperkaya pengetahuan dan ulasan yang akan dilakukan. Pada umumnya referensi-referensi yang didapatkan berasal dari jurnal-jurnal, buku, building code (ACI 318, NZS 3101, ITG 4.3R) dan data base hasil eksperimental yang pernah dilakukan. Juga pada tahap ini dilakukan peninjauan terhadap peraturan bangunan gedung beton bertulang mengenai tulangan pengekanan pada kolom yang nantinya akan dibandingkan.

3.3 Data dan Kriteria Hasil Eksperimental Kolom

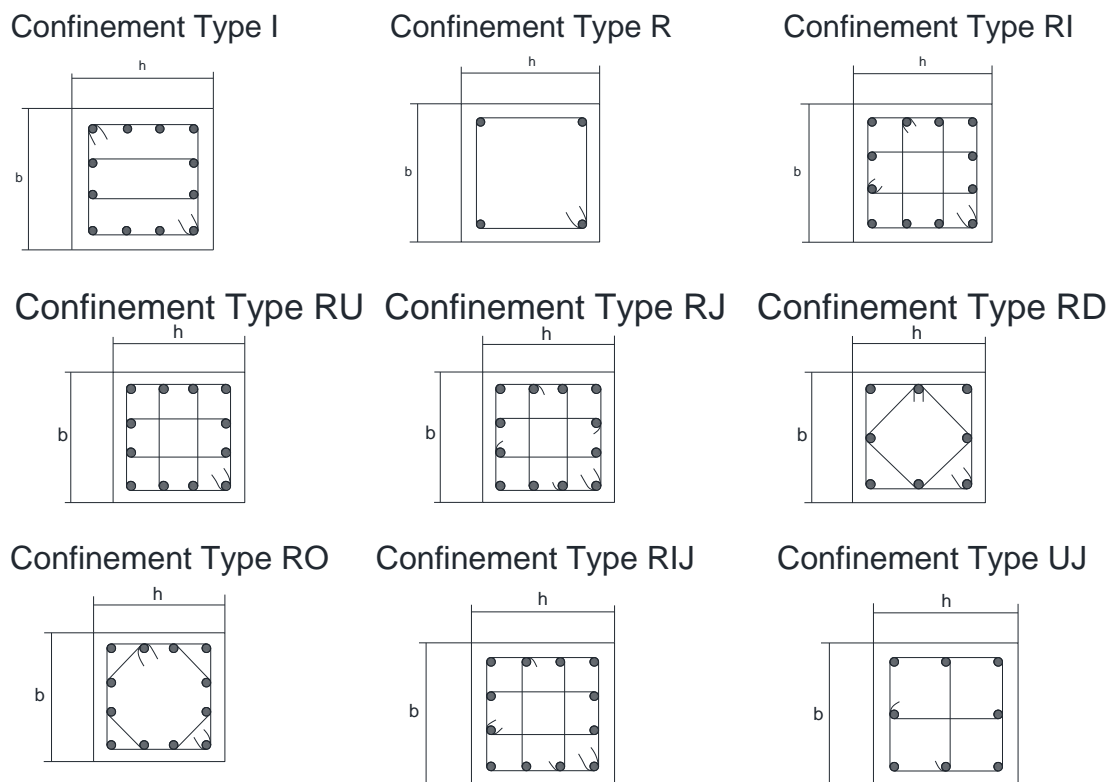
Data eksperimental diambil dari database hasil eksperimental kolom yang telah terkumpul dalam PEER structural Performance data-base (Berry et al. 2004). Akan tetapi tidak semua data yang diambil, data yang diambil adalah kolom yang menunjukkan memenuhi jarak spasi minimum tulangan transversal dari SNI 2847 (2013) (sebesar enam kali diameter tulangan longitudinal) akan tetapi mengalami gagal lentur. Berdasarkan kriteria ini, dari 363 data kolom yang tersedia hanya 163 kolom yang dapat dipakai untuk evaluasi kali ini.

Parameter deformasi yang digunakan dalam evaluasi kali ini adalah rasio drift δ . Berikut adalah tabel yang menunjukkan rentang parameter-parameter dari kolom-kolom yang terpilih (163 kolom):

Tabel 3.1 Rentang parameter dari PEER Column Database (Reiderer, 2003)

PARAMETER	MINIMUM	MAXIMUM	AVERAGE
f_{yt} , Mpa	255	1424	550
f'_c , Mpa	20.2	118	60.4
s, mm	25.4	229	77.5
A_{sh}/sb_c , %	0.11	3.43	1.15
A_{sh}/A_g , %	1.01	6.03	2.37
$P/A_g f'_c$	0.00	0.80	0.28

Perlu diketahui bahwa terdapat beberapa jenis pengekanan untuk kekangan persegi yang terdapat pada data base ini diantaranya adalah kekangan tipe Interlocking Ties (I), Rectangular ties (R), rectangular and interlocking ties (RI), rectangular ties and U-bars (RU), rectangular ties with j-hooks (RJ), rectangular and diagonal ties (RD), rectangular and octagonal ties (RO), rectangular and interlocking ties with j-hooks (RIJ), U-bars with J-hooks (UJ) dimana detail dari kekangan tipe ini dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.2 Tipe pengekanan persegi PEER Structural Performance Database (Berry et al, 2004)

3.4 Perbandingan Building Code

Perbandingan kebutuhan tulangan pengekanan ini dapat dilihat pada tabel 3.2 yang menunjukkan beberapa persamaan kebutuhan tulangan pengekanan untuk kolom persegi. Semua persamaan tersebut diturunkan dengan indicator batas pada suatu parameter deformasi pada waktu struktur mengalami kegagalan.

Perlu dicatat sebelumnya bahwa persamaan pada tabel ditunjukkan untuk resiko gempa tinggi dan persamaan yang didapat dalam bentuk $A_{sh}/s_b c_c$. terdapat

dua parameter deformasi yang sering dipakai dalam persamaan yang pertama adalah rasio daktilitas kurvatur $\mu\phi$ yang merupakan rasio kurvatur pada saat ultimate terhadap kurvatur pada saat leleh pertama. Kedua adalah rasio drift δ yang merupakan rasio antara simpangan antar lantai pada saat gagal dibagi dengan tinggi lantai. Berikut tabel 3.2 yang menunjukkan persamaan-persamaan yang dimaksud.

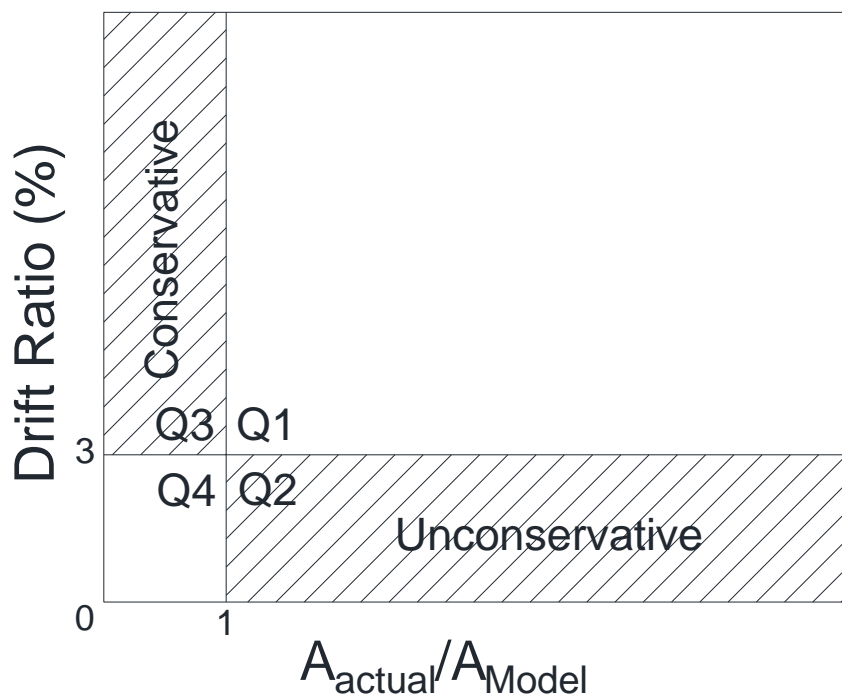
Tabel 3.2 Persamaan kebutuhan tulangan pengekanan untuk kolom persegi beton bertulang

Referensi	$A_{sh}/sb_c =$	Parameter Deformasi	Keterangan
SNI 2847 (2013)	$0.3 \frac{f'_c}{f_{yt}} \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \geq 0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	Tidak ada	$f_{yt} \leq 700 \text{ Mpa}$
ACI 318 (2011)	$0.3 \frac{f'_c}{f_{yt}} \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \geq 0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	Tidak ada	$f_{yt} \leq 700 \text{ Mpa}$
ACI 318 (2014)	$0.3 \frac{f'_c}{f_{yt}} \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) (1)$ $0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}} (2)$ $0.2k_f k_n \frac{P}{f_{yt} A_{ch}} (3)$ $k_f = \frac{f'_c}{175} + 0.6 \geq 1$ $k_n = \frac{n_l}{(n_l - 2)}$	δ	If $f'_c \leq 70 \text{ Mpa}$ and $\frac{P}{A_g f'_c} \leq 0.3$ Used Greater of (1) and (2) If $f'_c > 70 \text{ Mpa}$ and $\frac{P}{A_g f'_c} > 0.3$ Used Greater of (1), (2), and (3) $f_{yt} \leq 700 \text{ Mpa}$ $\delta = 0.03$
CSA A23.3- (2004)	$0.2k_n k_p \frac{f'_c A_g}{f_{yt} A_{ch}} \geq 0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}}$ $k_n = \frac{n_l}{(n_l - 2)}$ $k_p = \frac{P}{P_o}$ $P_o = \alpha_1 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y$ $\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_c \geq 0.67$	$\mu\phi$	$f_{yt} \leq 500 \text{ Mpa}$ Based on Paultre and Legeron (2008)
NZS 3101 (2006)	$\left(\frac{1.3 - \rho_l m}{3.3} \frac{f'_c}{f_{yt}} \frac{A_g}{A_{ch}} \frac{P}{\phi f'_c A_g} \right) - 0.006$ $\frac{A_g}{A_{ch}} \leq 1.5$ $\rho_l m \leq 0.4 \left(m = \frac{f_{yl}}{0.85 f'_c} \right)$	$\mu\phi$	$\phi = 0.85$ $f_{yt} \leq 800 \text{ Mpa}$ Based on Watson et al. (1994)
ITG 4.3R- (2007)	$\frac{b}{b_c} \left[0.35 \frac{f'_c}{f_{yt}} \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{1}{\sqrt{k_{ve} A_g f'_c}} \right]$ $k_{ve} = \left(\frac{0.15 b_c}{\sqrt{s h_x}} \right) \leq 1.0$ $\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \geq 0.3$ $\frac{P}{A_g f'_c} \geq 0.2$	δ	Based on Razvi and Saatcioglu (1994) dengan $\delta = 0.025$ $f_{yt} \leq 830 \text{ Mpa}$
Elwood et al. (2009)	$0.25k_n k_p \frac{f'_c A_g}{f_{yt} A_{ch}}$ $k_n = \left(0.6 + 0.4 \left(\frac{n}{n_{ls}} \right) \right) \left(\frac{(h_x + 300)}{500} \geq 1 \right)$ $k_p = \frac{P}{A_g f'_c} \geq 0.2$	δ	$f_{yt} \leq 700 \text{ Mpa}$ $\delta = 0.03$

A_{ch} : cross-sectional area of structural member measured out to out of transverse reinforcement; A_g : gross area of column; A_{sh} : total cross-sectional area of transverse reinforcement (including crossties) within spacing s and perpendicular to dimension b_c ; b_c : cross-sectional area member core measured ro outside edges of transverse reinforcement; f'_c : specified concrete strength; f_{yt} : specified yield strength of longitudinal reinforcement ; f_{yl} : specified yield strength of transverse reinforcement. ; h_x :: center to centre spacing of longitudinal reinforcement laterally supported by corner of hoop or hook of crosstie; m : mechanical reinforcing ratio; n_l :number of longitudinal reinforcement laterally supporter by corner of hoop, or hook of crosstie; p : axial compression tidak hanya untuk duka; p_u :nominal axial load strength at eccentricity; s spacing of transverse reinforcement; ρ_l : ratio of longitudinal reinforcement; ϕ : capacity reduction factor ; $\mu\phi$: curvature ductility ratio; δ : drift ratio.

3.5 Verifikasi

Setelah didapatkan hasil output dari permodelan kemudian dilakukan analisa terhadap model ini. Verifikasi yang dilakukan dalam hal ini dengan menggunakan *scatter plot* dimana dengan metode ini dapat dilihat distribusi data kolom yang ada. Sebanyak 163 data eksperimen kolom beton bertulang yang ada kemudian dilakukan pengujian terhadap perumusan kebutuhan tulangan transversal yang diusulkan Bersama dengan building code yang sudah disebutkan sebelumnya hal ini untuk menguji performa formulasi yang diusulkan. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk *scatter plot* drift (%) vs *Ash terpasang/Ash code*. Metode dalam menganalisa performa dari masing-masing formula adalah dengan membagi data-data yang ada kedalam kuadran-kuadran seperti pada gambar berikut:



Gambar 3.3 Pembagian kuadran *scatter plot*

Dari gambar 3.4 kemudian dapat dianalisa bahwa data-data yang ada dalam grafik dibagi menjadi 4 kuadran yaitu kuadran 1, kuadran 2, kuadran 3, dan kuadran 4 (Q1, Q2, Q3, dan Q4) yang penamaanya sesuai dengan gambar 3. Garis vertical pada grafik yang berada pada angka 1 mengindikasikan batas antara memenuhi dan tidak memenuhi kebutuhan pengekangan. Sedangkan garis horizontal yang berada

pada angka 3% mengindikasikan target performa kapasitas drift saat 20% pengurangan dari maksimum lateral load. Data kolom-kolom yang berada pada Q1 merupakan kolom-kolom yang memenuhi kebutuhan pengekangan dan kapasitas driftnya sama atau lebih dari target drift yaitu 3%.

Untuk kolom-kolom yang memenuhi kebutuhan tulangan pengekangan akan tetapi tidak mencapai target drift akan muncul pada Q2. Quadrant ini menunjukkan perumusan pengekangan yang tidak konservatif. Data kolom yang tidak memenuhi kebutuhan pengekangan dan juga tidak memenuhi target drift akan berada pada Q4. Sedangkan data kolom yang tidak memenuhi kebutuhan pengekangan akan tetapi memenuhi target drift akan berada pada Q3 dimana kuadran ini merupakan kuadran konservatif Karena membutuhkan lebih banyak pengekangan untuk mencapai target drift. Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa model yang ideal adalah model yang berada pada kuadran Q1 dan Q4.

Untuk melakukan perbandingan kuantitatif dari model-model yang menggunakan scatter plot ini, maka digunakan 2 perhitungan statistic untuk tiap model dan code. Statistic pertama berikut dipilih untuk menilai kemampuan model untuk menyediakan kapasitas drift yang mencukupi diwakili oleh nilai A yang merepresentasikan jumlah kolom yang memenuhi persyaratan pengekangan dan mencapai drift rasio $\leq 3\%$ atau dalam fungsi kuadran dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$A(\%) = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (48)$$

Statistic ke dua mewakili indikasi derajat konservasi pada model yang tercermin dalam nilai B yang merepresentasikan jumlah kolom yang tidak memenuhi persyaratan pengekangan dan drift rasionya $\leq 3\%$ atau dalam fungsi kuadran dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$B(\%) = \frac{Q_4}{Q_3 + Q_4} \quad (49)$$

Model yang ideal akan memberikan nilai A sebesar 0%, untuk menghindari over-conservatif, maka nilai B harus dimaksimalkan. Perbedaan diantara kedua statistic ini juga menyediakan wawasan tentang performa dari model, dan merupakan

representasi yang baik terhadap performa model secara keseluruhan dengan mempertimbangkan semua kolom.

$$C = B - A \quad (50)$$

Nilai C yang besar mengindikasikan model yang aman juga tidak over-konservatif. Verifikasi dikatakan sukses atau ok jika salah satu dari model proposed 1 dan proposed 2 mencapai nilai C yang terbesar dibandingkan dengan model-model lainnya.

3.6 Hasil Kesimpulan Penelitian

Berdasarkan pada verifikasi pengujian secara numerik dan eksperimental pada data kolom-kolom yang ada maka dapat ditarik kesimpulan dari seluruh studi yang telah dilakukan. Perilaku kegagalan kolom yang ada juga menjadi cakupan kesimpulan yang dilakukan. Hasil akhir dari studi ini kemudian berupa pengajuan usulan perhitungan tulangan pengekangan yang baru untuk SNI 2847 (2013).

BAB 4

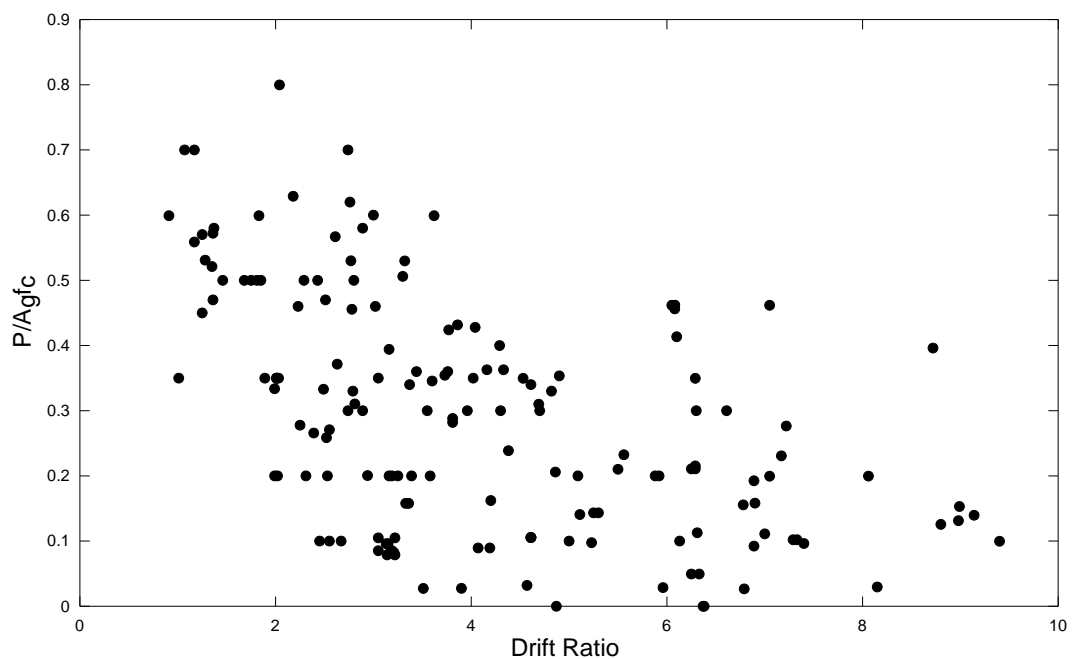
ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Pada bab ini akan disajikan factor-faktor yang mempengaruhi drift ratio yang tentunya berkaitan erat dengan fungsi dari tulangan pengekangan. Juga akan disajikan grafik-grafik yang menunjukkan kinerja dari model rumusan pengekangan yang diajukan terhadap building code-building code yang ada yang nantinya akan dihitung secara statistik kemampuannya berdasarkan pada nilai A, B dan C untuk menentukan performa terbaik.

4.2 Faktor yang mempengaruhi drift ratio.

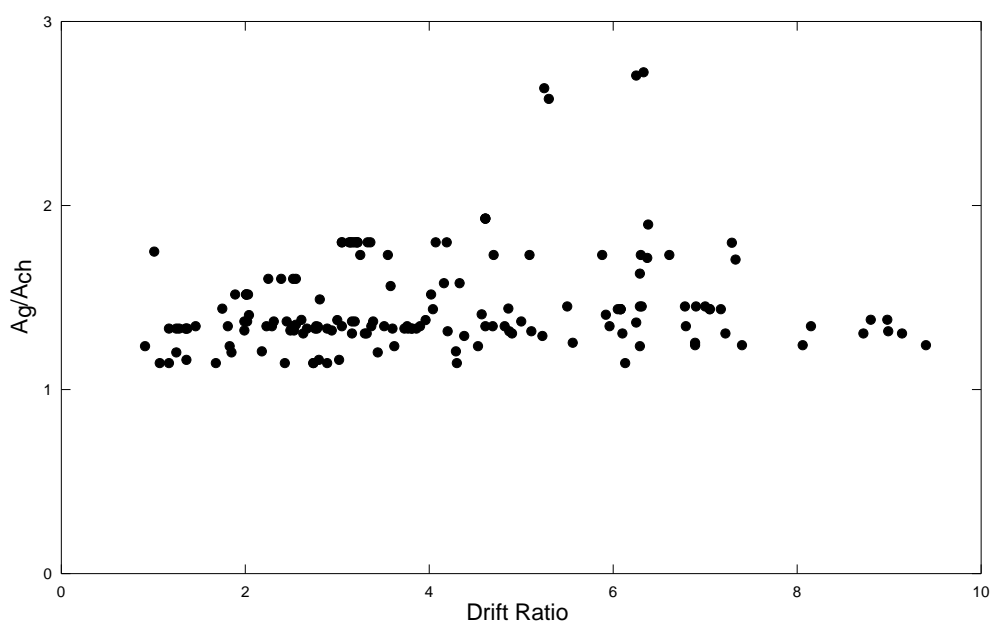
Salah satu factor penting yang juga perlu untuk dipelajari adalah factor-faktor apa saja yang mempengaruhi daktilitas dari kolom yang ada. Untuk mengetahuinya digunakan data-data kolom yang ada untuk mengidentifikasi factor yang mempengaruhi daktilitas dalam hal ini berupa drift ratio. Factor pertama yang perlu diperhatikan adalah rasio beban aksial yang dapat ditunjukkan dalam gambar 4.1 berikut:



Gambar 4. 1 Grafik rasio beban aksial vs drift rasio

Dari gambar diatas kemudian dapat diperhatikan bahwa terdapat persebaran yang cukup variatif atau hubungan yang spesifik pada grafik dimana dapat dilihat hubungan yang cukup deskriptif yaitu dengan semakin besarnya rasio beban aksial yang terjadi maka drift ratio semakin kecil begitu pula sebaliknya dengan semakin kecilnya rasio beban aksial akan menghasilkan drift ratio yang semakin besar pula. Rasio beban aksial terbesar yaitu sebesar 0.7998 dengan drift 2.04 % sedangkan drift terbesar yaitu 9.4% memiliki rasio beban aksial sebesar 0.0997. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa jumlah kolom dengan rasio beban aksial dibawah 0.5 merupakan yang paling banyak dibandingkan rasio diatas nya. Dari data-data tersebut dapat disimpulkan bahwa rasio beban aksial memengaruhi drift ratio sehingga factor rasio beban aksial dapat dikategorikan sebagai salah satu factor yang mempengaruhi drift ratio.

Juga terdapat factor A_g/A_{ch} yang mungkin dapat mempengaruhi drift ratio dari kolom-kolom yang ada yang dapat dilihat pada gambar 4.2 berikut ini:

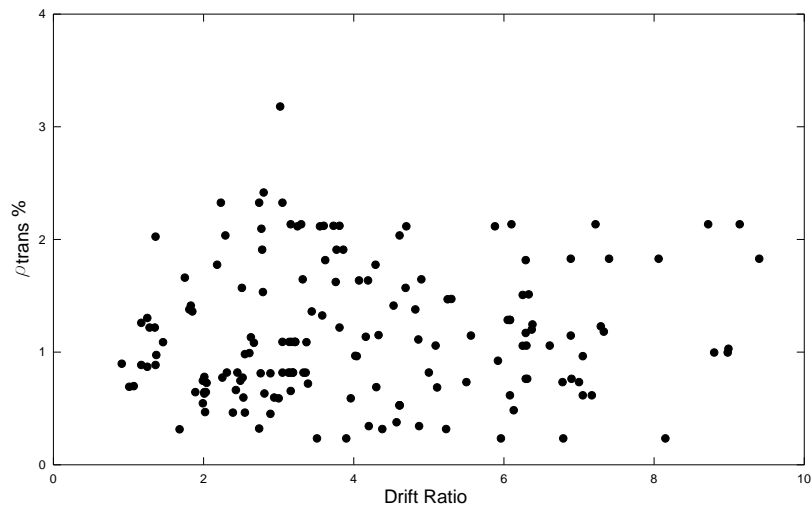


Gambar 4. 2 Grafik A_g/A_{ch} vs drift rasio

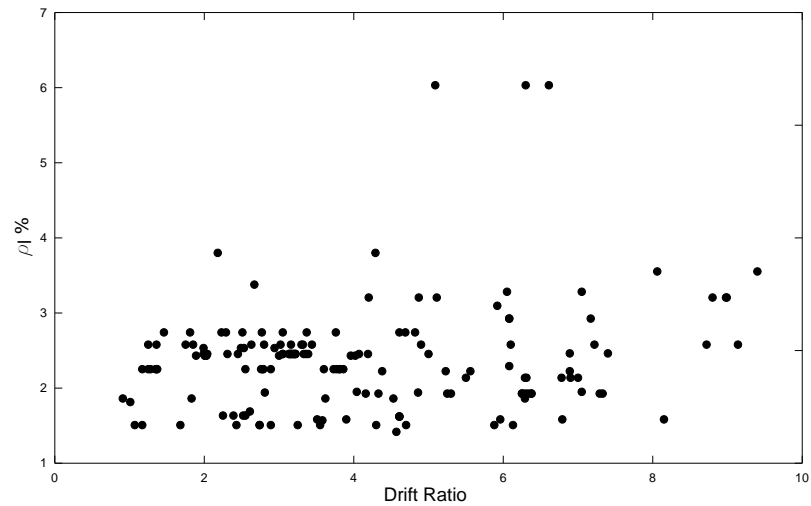
Dari gambar 4.2 diatas dapat dilihat bahwa keseluruhan data berada didalam rasio A_g/A_{ch} antara 1 dan 2 dimanya hanya beberapa saja yang berada diluar interval ini. Dengan persebaran data pada interval ini dengan variasi drift ratio juga pada interval ini maka, persebaran data pada grafik diatas tidak menunjukkan hubungan

yang spesifik terhadap drift rasio sehingga hal ini menunjukkan bahwa factor A_g/A_{ch} tidak dapat mempengaruhi drift rasio yang terjadi.

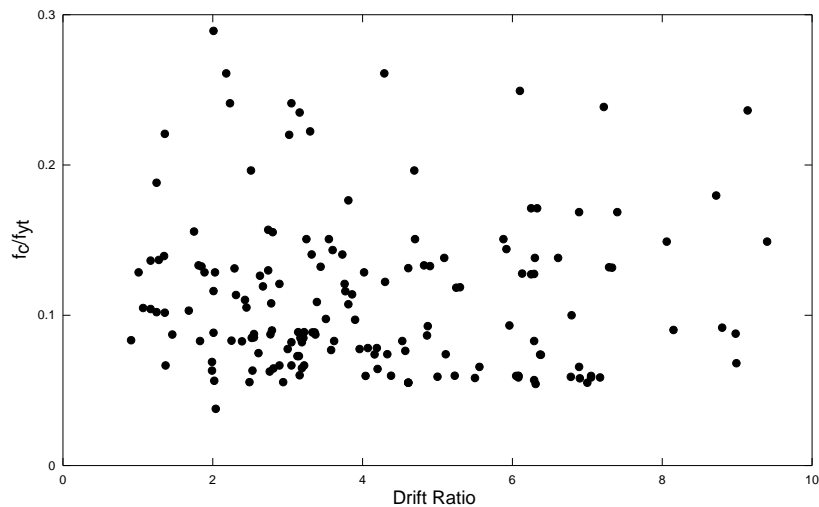
Terdapat beberapa factor lain yang memungkinkan sebagai salah satu factor yang mempengaruhi drift rasio yang gambar-gambarnya dapat dilihat berikut ini:



Gambar 4. 3 Grafik Area transversal vs Drift rasio



Gambar 4. 4 Grafik Area longitudinal vs Drift rasio



Gambar 4. 5 Grafik f_c/f_{yt} vs drift rasio

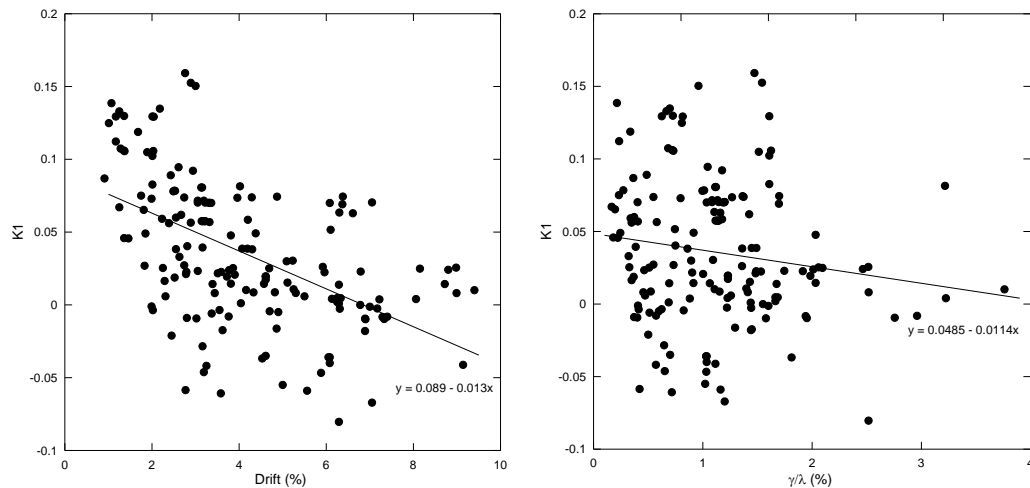
Dari grafik-grafik diatas dapat dilihat bahwa kurang lebih terlihat pola yang sama atau mirip dengan grafik A_g/A_{ch} vs drift dimana terdapat hubungan yang signifikan diantara parameter yang ada dengan drift rasio yang terjadi atau dengan kata lain parameter-parameter ini tidak dapat mempengaruhi drift rasio yang terjadi. Berdasarkan grafik-garfik yang sudah ditunjukkan dapat disimpulkan bahwa meskipun parameter-parameter diatas memiliki dampak kinerja seismic pada kolom akan tetapi tidak ada parameter yang mempengaruhi drift rasio yang lebih signifikan dibandingkan dengan rasio beban aksial. Sehingga dalam grafik performa dari formulasi tulangan sengkang yang berikut ditunjukkan akan dimasukkan factor rasio beban aksial untuk menunjukkan perbandingan yang lebih informatif dan akurat.

4.3 Nilai k_1 Usulan Formulasi tulangan transversal

Formulasi tulangan transversal yang diajukan dilakukan dengan modifikasi dari metode Pujol et al (2000). Formulasi kebutuhan tulangan yang diusulkan berdasarkan data eksperimental sejumlah 163 kolom beton bertulang dengan tulangan sengkang persegi.

Pada formulasi kebutuhan tulangan transversal yang akan diusulkan terdapat beberapa modifikasi pada metode Pujol et al (2000) diantaranya:

Perhitungan terhadap nilai k_1 dilakukan dengan 2 metode yang pertama adalah dalam korelasi nilai k_1 terhadap drift sedangkan metode yang kedua adalah dalam korelasi nilai k_1 terhadap drift rasio/ λ (a/d). Kedua metode ini dilakukan untuk 163 data kolom beton bertulang. Nilai k_1 untuk masing-masing metode ini dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4. 6 Grafik nilai k_1 vs drift dan nilai k_1 vs γ/λ

Oleh karenanya terdapa dua nilai k_1 yang didapatkan dimana dapat dilihat berikut, relasi antara nilai k_1 dan drift rasio dapat ditulis dalam persamaan berikut :

$$k_1 = 0.089 - 0.013\delta \geq 0 \quad (51)$$

relasi antara nilai k_1 dan γ/λ dapat ditulis dalam persamaan berikut :

$$k_1 = 0.0485 - 0.0114(\gamma / \lambda) \geq 0 \quad (52)$$

Dalam penelitian ini digunakan 3% drift sebagai target parameter deformasi dalam mengevaluasi ketentuan pengekanan terhadap data eksperimental. Nilai ini diambil dari nilai drift gempa terbesar yang diperbolehkan diatur dalam ASCE [11] yaitu sebesar 1,5 kali nilai desain dimana drift sebesar 2% merupakan drift limit untuk gedung beton bertulang.

Modifikasi formulasi oleh Pujol et al (2000) juga dengan menambahkan factor k_n , factor efektifitas pengekanan dan kebutuhan tulangan transversal minimum juga ditambahkan dalam perumusan usulan kebutuhan tulangan transversal. Dimana kebutuhan tulangan transversal minimum yang diusulkan sebagai berikut :

$$\frac{A_{sh}}{sb_c} \min = 0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (53)$$

Formulasi faktor efektifitas pengekangan, k_n adalah sebagai berikut :

$$k_n = \left(\frac{n_{ls}}{n_{ls} - 2} \right) \left(\frac{h_x + 300}{500} \geq 1 \right) \quad (54)$$

Dimana: k_n = efektifitas pengekangan
 n_{ls} = jumlah tulangan longitudinal yang didukung oleh sengkang ataupun hook seismik ≥ 135 derajat
 h_x = spasi horisontal hook diukur dari inti tulangan

Dengan modifikasi diatas maka diusulkan formulasi kebutuhan tulangan transversal sebagai berikut :

$$\frac{A_{sh}}{sb_c} = \frac{3}{8} \alpha + 1 - \frac{5}{8} \sqrt{\alpha^2 - \beta^2} \frac{P}{A_{ch} f_{yt}} \geq 0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (55)$$

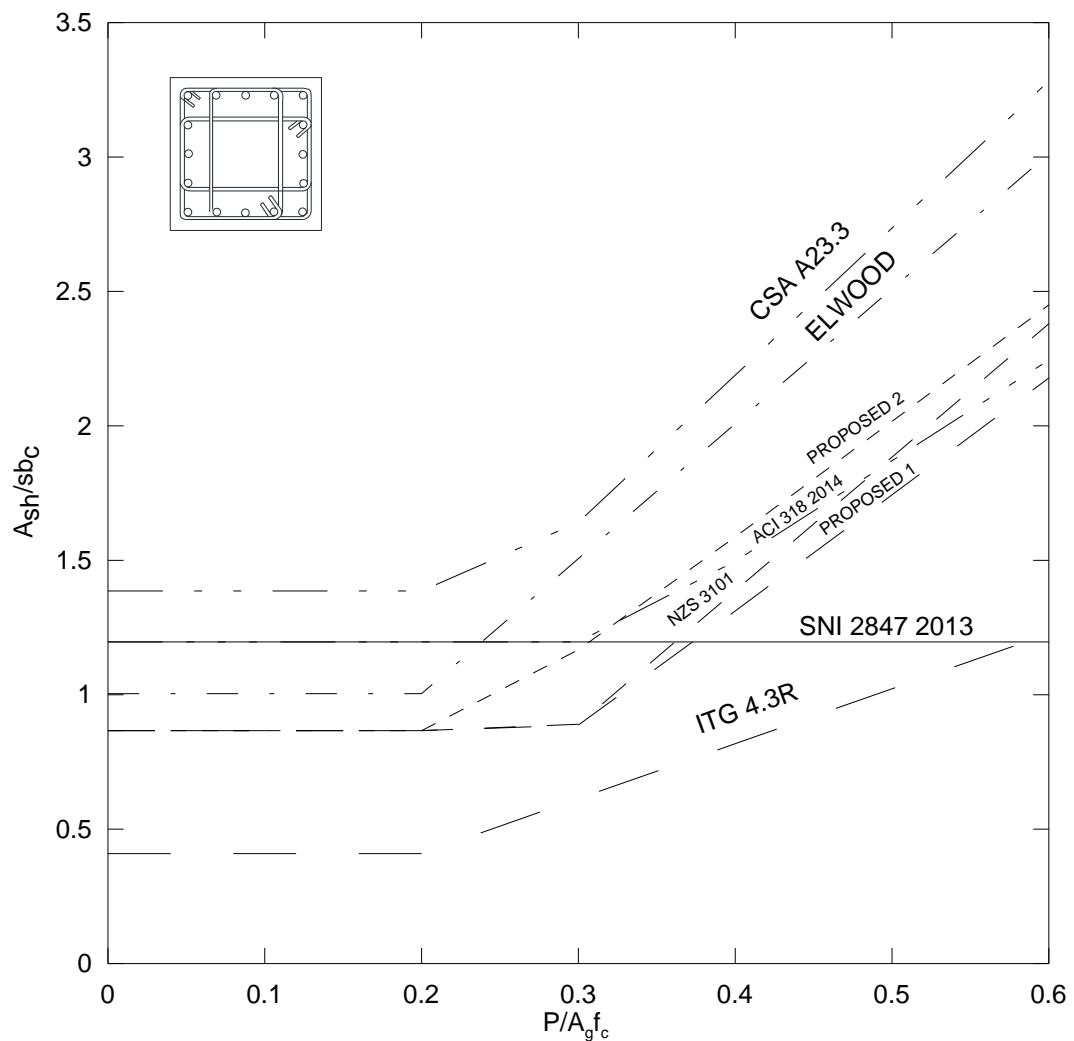
Dimana: A_{ch} = luas area inti beton

Formulasi diatas dibatasi pada $f_{yt} \leq 800$ Mpa.

Hasil perumusan kebutuhan tulangan pengekangan yang dihasilkan kemudian dilakukan perbandingan dengan code building lainnya untuk meninjau performanya. Oleh karenanya untuk penelitian ini formulasi pengekangan yang diajukan diberi label model proposed 1 dan proposed 2. Dimana model proposed 1 mewakili modifikasi metode Pujol et al (2000) yang nilai k_1 berdasarkan relasinya dengan drift rasio. Sedangkan untuk model proposed 2 mewakili modifikasi metode Pujol et al (2000) yang nilai k_1 berdasarkan relasinya dengan γ/λ .

4.4 Perbandingan kebutuhan sengkang terhadap rasio beban aksial

Seperti telah dinyatakan sebelumnya bahwa rasio beban aksial merupakan salah satu factor yang mempengaruhi kebutuhan tulangan pengekangan. Variasi terhadap rasio beban aksial akan mempengaruhi kebutuhan tulangan pengekangan oleh masing-masing model building code. Berikut adalah grafik yang menunjukkan perbandingan kebutuhan tulangan pengekangan yang berbeda-beda untuk masing-masing model atau code dimana factor rasio beban aksial merupakan factor utama yang mempengaruhi kebutuhan tulangan sengkang dan model yang digunakan merupakan model CH10.



Gambar 4. 7 Perbandingan kebutuhan tulangan pengekanan vs rasio beban aksial

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa terdapa kebutuhan tulangan pengekanan yang bervariasi untuk masing-masing model seiring dengan kenaikan rasio beban aksial. Pada gambar dapat dilihat bahwa pada keadaan rasio beban aksial yang bervariasi tidak terjadi perubahan kebutuhan tulangan pengekanan oleh SNI 2847 2013 yang bersumber pada ACI 318 2011 hal ini menunjukkan bahwa factor rasio beban aksial merupakan salah satu factor yang belum diperhitungkan dalam perumusan tulangan pengekanan oleh SNI 2847 2013.

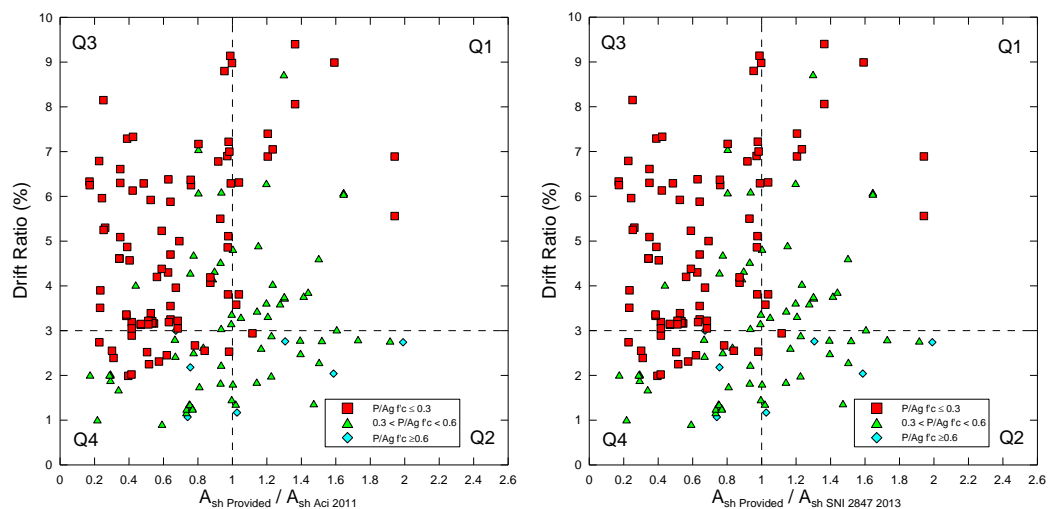
Pada rasio beban aksial 0 dapat dilihat bahwa kebutuhan pengekanan tertinggi diduduki oleh CSA A23.3 sedangkan terendah terdapat model ITG 4.3R. Juga dapat diperhatikan bahwa pada rasio aksial 0 model ACI 318 2014 menunjukkan kebutuhan pengekanan yang sama dengan SNI 2847 2013 sedangkan model

lainnya berada dibawahnya. Seiring dengan bertambahnya rasio beban aksial maka semakin bertambah pula kebutuhan pengekanan yang dibutuhkan oleh masing-masing model. Pada rasio beban aksial mencapai 0.6 maka kebutuhan pengekanan oleh ITG 4.3R sudah melebihi SNI 2847 2013 sedangkan pada tahap ini kebutuhan pengekanan terbesar masih diduduki oleh CSA A23.3.

Perlu diperhatikan bahwa pada rasio beban aksial awal, kebutuhan pengekanan oleh NZS 3101, Proposed 2 dan Proposed 1 adalah sama kemudian dengan meningkatnya rasio beban aksial model proposed 2 memiliki perubahan yang lebih signifikan disusul oleh model NZS 3101 lalu oleh model Proposed 1. Perubahan kenaikan kebutuhan tulangan pengekanan oleh model proposed 1 terjadi pada rasio beban aksial 0.3 begitu juga dengan model NZS 3101 sedangkan pada model proposed 2 hal ini terjadi pada rasio beban aksial 0.2.

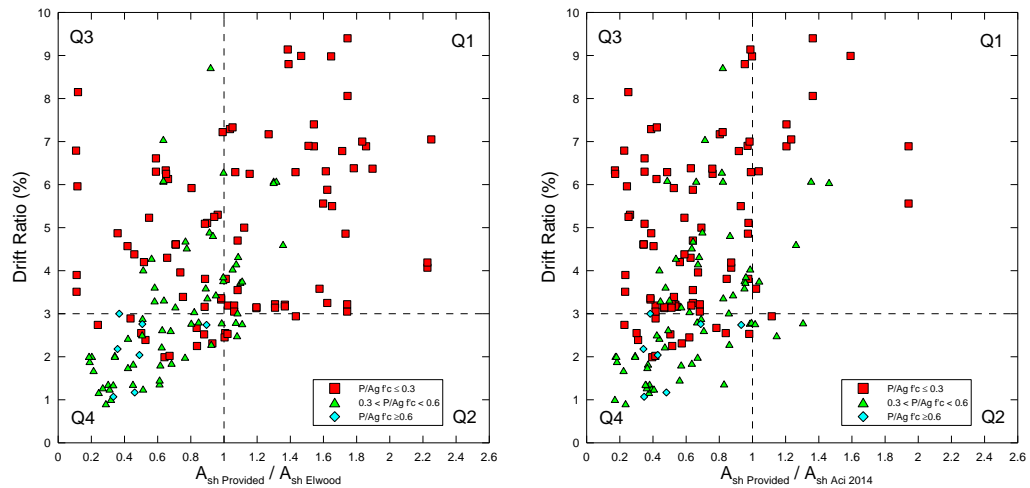
4.5 Perbandingan kinerja model pengekanan

Seperti yang sudah dikatakan sebelumnya bahwa untuk mengukur kemampuan kinerja dari masing-masing model pengekanan maka hasil yang ditunjukkan akan disajikan dalam *scatter plot* dari masing-masing model terhadap drift rasio (%) dengan target sebesar 3%. Grafik-grafik tersebut kemudian dikelompokkan untuk masing-masing formula dari masing-masing code. Formulasi kebutuhan tulangan transversal yang diusulkan diberi nama atau label proposed 1 dan proposed 2. Berikut grafik-grafik yang dihasilkan.

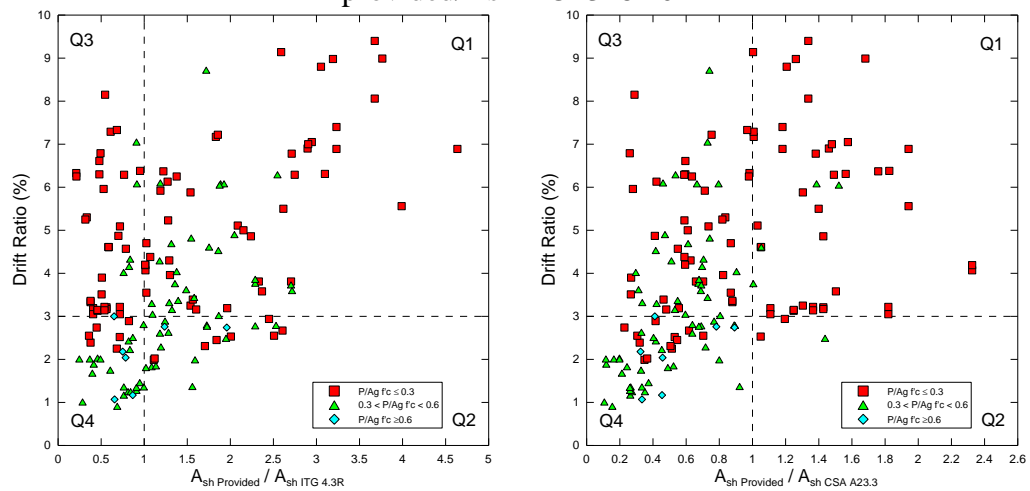


Gambar 4. 8 Drift rasio vs Ash provided/Ash ACI 318 2011 dan Drift rasio vs Ash provided/Ash SNI 2847 2013

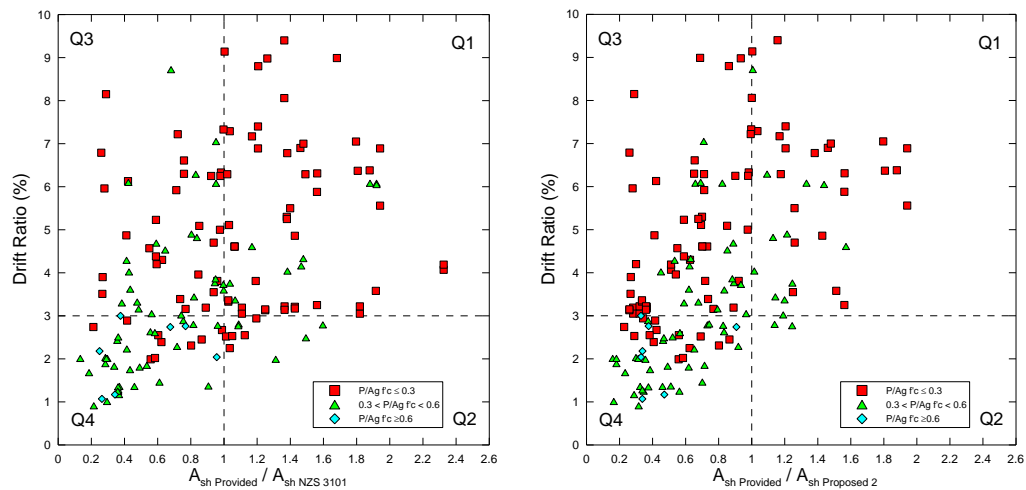
Dari grafik diatas sengaja untuk didampingkan antara model ACI 318 2011 dan SNI 2847 2013 dikarenakan keduanya menggunakan formulasi tulangan transversal yang sama sehingga menghasilkan performa kerja yang sama pula.



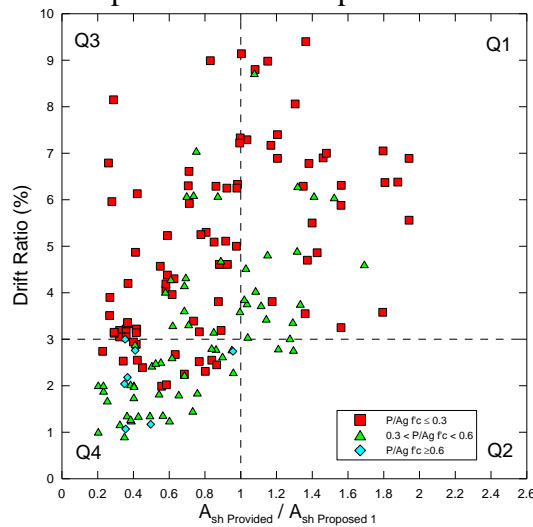
Gambar 4. 9 Drift rasio vs Ash provided/Ash Elwood dan Drift rasio vs Ash provided/Ash ACI 318 2014



Gambar 4. 10 Drift rasio vs Ash provided/Ash ITG 4.3R dan Drift rasio vs Ash provided/Ash CSA A23.3



Gambar 4. 11 Drift rasio vs Ash provided/Ash NZS 3101 dan Drift rasio vs Ash provided/Ash Proposed 2



Gambar 4. 12 Drift rasio vs Ash provided/Ash Proposed 1

Dari gambar 4.6 sampai dengan gambar 4.10 dapat dilihat perbedaan yang cukup mencolok antara grafik yang satu dengan yang lain. Data kolom-kolom dikelompokkan lagi berdasarkan rasio beban aksial seperti yang sudah disebutkan juga sebelumnya dimana pembagian ini dibagi menjadi 3 kelompok data yaitu interval $P/Ag f_c' \leq 0.3$, interval $0.3 \leq P/Ag f_c' \leq 0.6$, dan interval $P/Ag f_c' \geq 0.6$. Secara keseluruhan kolom dengan rasio beban aksial ≤ 0.3 memiliki jumlah yang mendominasi dan paling banyak dibanding yang lain sedangkan kolom dengan rasio beban aksial ≥ 0.6 merupakan data kolom yang paling sedikit populasinya dibandingkan dengan yang lain. Kolom dengan rasio beban aksial ≤ 0.3 merupakan kelompok data kolom yang memiliki rata-rata drift ratio terbesar bahkan untuk beberapa kolom bisa mencapai drift ratio diatas 9% juga dapat diperhatikan bahwa

kelompok ini rata-rata memiliki drift ratio diatas target drift 3% sedangkan kelompok data kolom dengan rasio beban aksial ≥ 0.6 merupakan kelompok dengan rata-rata drift ratio yang rendah bahkan tidak dapat melampaui target drift 3%. Sedangkan kelompok data kolom dengan rasio beban aksial diantara 0.3 sampai dengan 0.6 memiliki drift ratio yang berada diantara kedua kelompok sebelumnya.

Dari gambar 4.7 untuk grafik model SNI 2847 2013 dan ACI 318 2011 dapat dilihat bahwa sebaran data cukup merata pada masing-masing kuadran akan tetapi kebanyakan data kolom berada pada kuadran Q3 sedangkan data yang paling sedikit berada pada kuadran Q2. Juga dapat diperhatikan bahwa rata-rata data kolom yang tidak memenuhi persyaratan kebutuhan tulangan ($A_{shprovided} / A_{shcode} < 1$) memiliki jumlah yang lebih banyak dibandingkan dengan yang memenuhi. Sangat sedikit sekali data kolom dengan rasio beban aksial ≤ 0.3 yang memenuhi persyaratan kebutuhan tulangan transversal ($A_{shprovided} / A_{shcode} \geq 1$). Jumlah data pada Q3 dan Q2 masih cukup banyak jika dibandingkan relative terhadap Q1 dan Q4 sebagai area kuadran yang ideal dan hal ini menunjukkan hasil yang kurang begitu bagus. Mengingat diharapkan data kolom berada pada kuadran Q1 dan Q4 diharapkan lebih banyak dibandingkan dengan Q2 dan Q3. Juga dapat dilihat bahwa tidak ada kolom dengan rasio beban aksial ≥ 0.6 yang dapat melewati drift ratio 3%.

Untuk gambar 4.8 grafik perumusan oleh Elwood, dapat dilihat bahwa pada kuadran Q2 memiliki data kolom yang sangat sedikit dibandingkan dengan kuadran yang lain dan ini merupakan hal yang bagus dimana diharapkan nilai Q2 seminimal mungkin bahkan 0. Jika dibandingkan dengan model SNI 2847 2013 dan ACI 318 2011, model Elwood menghasilkan data Q2 yang jauh lebih sedikit dengan perbedaan yang drastis. Dari model ini juga dapat dilihat bahwa cukup banyak data kolom dengan rasio beban aksial ≤ 0.3 yang melewati persyaratan kebutuhan tulangan transversal ($A_{shprovided} / A_{shcode} \geq 1$) juga rata-rata kolom dengan rasio beban aksial ≤ 0.3 dapat mencapai drift target. Data kolom dengan rasio beban aksial ≥ 0.6 pada model ini juga tidak bisa melampaui drift target 3% sama dengan model sebelumnya. Dapat juga diperhatikan bahwa jumlah kolom yang berada pada Q1 dan Q4 sebagai kuadran ideal menunjukkan populasi yang lebih banyak jika dibandingkan dengan yang berada pada Q2 dan Q3 dan ini merupakan hal yang baik.

Untuk gambar 4.8 grafik model ACI 318 2014, dapat dilihat memiliki pola yang hampir sama dengan model Elwood dengan jumlah kolom Q2 yang sangat sedikit dan ini merupakan hal yang bagus. Yang perlu diperhatikan adalah hanya sedikit data kolom yang memenuhi persyaratan kebutuhan tulangan transversal ($A_{shprovided} / A_{shcode} \geq 1$) dan perubahan ini cukup signifikan jika dibandingkan dengan model-model sebelumnya. Data kolom dengan rasio beban aksial ≥ 0.6 pada model ini juga tidak bisa melampaui drift target 3% sama dengan model sebelumnya. Juga dapat diperhatikan bahwa jumlah kolom pada Q2 merupakan yang terkecil jika dibandingkan dengan kuadran yang lain. Akan tetapi kolom pada kuadran Q3 sendiri jumlahnya jauh lebih banyak jika dibandingkan dengan kuadran Q4 dan Q1 dan ini bukan merupakan hal yang baik.

Untuk gambar 4.9 grafik model ITG 4.3R, dapat dilihat bahwa terdapat pola distribusi yang berbeda dengan model-model sebelumnya dimana pada model ini banyak data kolom yang memenuhi persyaratan kebutuhan tulangan transversal ($A_{shprovided} / A_{shcode} \geq 1$) jika dibandingkan dengan yang tidak memenuhi. Data kolom yang memenuhi persyaratan kebutuhan tulangan transversal ($A_{shprovided} / A_{shcode} \geq 1$) pada model ini merupakan yang terbesar jika dibandingkan dengan model-model sebelumnya maupun setelahnya yaitu sebesar 4,64 dimana nilai ini berada pada rasio beban aksial ≤ 0.3 . Akan tetapi jumlah data pada kuadran Q4 pada model ini menjadi meningkat dibandingkan dengan model yang lain dan ini merupakan hal yang merugikan meskipun data kolom pada kuadran Q2 merupakan yang paling sedikit jika dibandingkan dengan kuadran lainnya. Jumlah data kolom pada kuadran Q3 juga berkurang cukup signifikan jika dibandingkan dengan model-model sebelumnya. Hal yang positif adalah jumlah data kolom-kolom pada kuadran Q1 dan Q4 lebih banyak dari pada kuadran Q3 dan Q2 hal ini menunjukkan cukup banyak data kolom yang memenuhi model ITG 4.3R.

Untuk gambar 4.9 grafik model CSA A23.3, dapat diperhatikan bahwa pola distribusi data kolom mengikuti model-model sebelumnya pada umumnya dengan data kolom pada kuadran Q2 paling sedikit dibandingkan kuadran yang lain sekitar hanya 3 data kolom yang berada pada kuadran ini. Juga dapat dilihat bahwa data kolom pada kuadran Q3 merupakan yang paling banyak. Hal yang positif adalah

cukup banyak juga data kolom yang berada pada area kuadran Q1 dan Q4. Drift rasio terendah berada pada kolom dengan rasio beban aksial antara 0.3 sampai 0.6.

Untuk gambar 4.10 grafik model NZS 3101, dapat diperhatikan bahwa persebaran data nya lebih merata dengan konsekuensi jumlah data pada kuadran Q2 meningkat. Juga dapat diperhatikan bahwa jumlah data pada kuadran Q1 dan Q4 relatif lebih banyak dibandingkan dengan kuadran Q2 dan Q3.

Untuk gambar 4.10 grafik model Proposed 2, dapat diperhatikan bahwa pola distribusi data kolom menyerupai model yang lain akan tetapi dengan jumlah data kolom pada kuadran Q2 paling sedikit relative terhadap keseluruhan model. Data kolom dengan rasio beban aksial ≥ 0.6 pada model ini juga tidak bisa melampaui drift target 3% sama dengan model sebelumnya. Juga banyak terdapat kolom dengan rasio beban aksial ≤ 0.3 yang tidak memenuhi persyaratan kebutuhan tulangan transversal ($A_{shprovided} / A_{shcode} < 1$). Hal yang positif adalah cukup banyak data kolom yang terletak pada kuadran Q4 dan Q1 meskipun jumlah data kolom pada kuadran Q3 merupakan yang terbanyak jika dibandingkan dengan kuadran-kuadran yang lain. Jumlah data kolom pada Q1 ditambah Q4 jika semakin banyak akan semakin baik dimana menunjukkan banyaknya kolom yang masuk kategori ideal.

Untuk gambar 4.11 grafik model Proposed 1, dapat diperhatikan bahwa pola distribusi data kolom menyerupai model proposed 2 dengan jumlah data kolom pada kuadran Q2 paling sedikit relative terhadap keseluruhan model yaitu hanya 2 data kolom dengan rasio beban aksial pada interval $0.3 \leq P/A_g f_c' \leq 0.6$. Data kolom dengan rasio beban aksial ≥ 0.6 pada model ini juga tidak bisa melampaui drift target 3% sama dengan model sebelumnya. Juga banyak terdapat kolom dengan rasio beban aksial ≤ 0.3 yang tidak memenuhi persyaratan kebutuhan tulangan transversal ($A_{shprovided} / A_{shcode} < 1$). Hal yang positif adalah cukup banyak data kolom yang terletak pada kuadran Q4 dan Q1 yang merupakan kuadran ideal meskipun jumlah data kolom pada kuadran Q3 merupakan yang terbanyak jika dibandingkan dengan kuadran-kuadran yang lain hal ini serupa dengan pola model proposed 2. Jumlah data kolom pada Q1 ditambah Q4 jika semakin banyak akan semakin baik dimana menunjukkan banyaknya kolom yang masuk kategori ideal. Untuk dapat membandingkan secara statistic, jumlah data kolom perkuadran

kemudian akan dihitung kedalam nilai A, B dan nilai C yang kemudian dapat dilakukan perbandingan yang lebih akurat.

4.6 Perbandingan nilai A, B, dan C

Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya bahwa persebaran data kolom yang ada akan dibagi kedalam empat kuadran yang mana untuk masing-masing kuadran akan dihitung secara kuantitatif dan akan dituangkan kedalam nilai-nilai statistic A, B dan nilai C. dimana diharapkan bahwa semakin kecil nilai A menunjukkan performa yang bagus sedangkan untuk nilai B semakin besar akan semakin bagus yang mencerminkan kondisi ideal dari suatu model. Pada akhirnya akan dihitung nilai C sebagai penentu performa atau kinerja dari tiap-tiap model dimana dengan semakin besar nilai C yang menunjukkan performa yang semakin baik. Jumlah untuk masing-masing kuadran dan perhitungan nilai A, B dan C dapat dilihat pada table berikut ini:

Tabel 4. 1 Perhitungan jumlah kuadran

	SNI 2847 2013	ACI 318 2011	CSA A23.2	Elwood	NZS 3101	ITG 4.3R	ACI 318 2014	Proposed 1	Proposed 2
Q1	30	30	45	55	56	69	14	44	36
Q2	18	18	3	7	10	24	4	2	2
Q3	78	78	63	53	52	39	94	64	72
Q4	37	37	52	48	45	31	51	53	53
total	163	163	163	163	163	163	163	163	163

Dari tabel 4.1 dapat dilihat jumlah persebaran data kolom secara kuantitatif untuk tiap kuadran pada masing-masing model. Dapat juga dilihat bahwa nilai kuadran Q1 terbesar terdapat pada model ITG 4.3R sebesar 69 sedangkan yang terkecil terdapat pada model ACI 319 2014 sebesar 14 karena kuadran ini merupakan kuadran ideal maka semakin banyak kolom yang masuk dalam kuadran ini akan semakin baik. Sedangkan untuk kuadran Q2 terbesar terdapat pada model ITG 4.3R sebesar 24 sedangkan yang terkecil terdapat pada model proposed 1 dan proposed 2 sebesar 2 dimana pada kuadran ini diharapkan nilai seminimal mungkin Karena kuadran ini bukan merupakan kuadran yang ideal bahkan merupakan kuadran tidak konservatif. kuadran Q3 terbesar terdapat pada model ACI 318 2014 sebesar 94

sedangkan yang terkecil terdapat pada model ITG 4.3R sebesar 39. Nilai pada kuadran Q3 diharapkan sekecil mungkin Karena kuadran ini merupakan kuadran konservatif. Dan yang terakhir, kuadran Q4 nilai terbesar terdapat pada model Proposed 1 dan Proposed 2 sebesar 53 sedangkan yang terkecil terdapat pada model ITG 4.3R sebesar 31. Nilai pada kuadran ini diharapkan sebesar mungkin Karena ini merupakan kuadran ideal. Dari nilai untuk masing-masing kuadran ini kemudian dapat dihitung secara statistic untuk nilai A, B dan nilai C yang dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 4. 2 Perhitungan nilai A, B dan C

	SNI 2847 2013	ACI 318 2011	CSA A23.2	Elwood	NZS 3101	ITG 4.3R	ACI 318 2014	PROPOSED 1	PROPOSED 2
A	0.375	0.375	0.063	0.113	0.152	0.258	0.222	0.043	0.053
B	0.322	0.322	0.452	0.475	0.464	0.443	0.352	0.453	0.424
C	-0.0533	-0.0533	0.3897	0.3623	0.3124	0.1848	0.1295	0.4095	0.3714

Dari tabel 4.2. Dapat diperhatikan bahwa untuk masing masing nilai A, B dan C sudah dihitung untuk masing-masing model. Dapat dilihat bahwa nilai A diharapkan sekecil mungkin atau mendekati 0 dan nilai A terkecil terdapat pada model Proposed 1 dengan nilai 0.043 disusul dengan model proposed 2 sebesar 0.053. Sedangkan Nilai B diharapkan sebesar mungkin atau maksimal dan nilai B terbesar terletak pada model Elwood dengan nilai sebesar 0.475 disusul dengan model NZS dengan nilai B sebesar 0.464. Sedangkan untuk dapat menyatakan secara statistic bahwa suatu model lebih baik performanya dibandingkan dengan yang lain harus menghasilkan nilai C yang besar. Dibandingkan dengan model-model lainnya, model yang diusulkan memiliki nilai C yang paling besar dibandingkan dengan yang lainnya yaitu pada model proposed 1 sebesar 0.4095 tidak berbeda jauh dengan model CSA A23.2 sebesar 0.3897. sedangkan untuk model proposed 2 merupakan nilai C terbesar ke 3 dengan nilai sebesar 0.3714. Juga dapat dilihat bahwa model SNI 2847 2013 memiliki performa yang paling mengecewakan dibandingkan dengan model-model lainnya dengna nilai C sebesar -0.0533 yang memiliki perbedaan nilai yang signifikan dengan model yang diajukan yakni proposed 1. Dengan ini sudah terbukti bahwa model yang diusulkan

yaitu model Proposed 1 memiliki performance yang lebih baik dibandingkan dengan model-model lainnya. Model ini menyediakan performance yang aman akan tetapi tidak overkonservatif.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisa dari hasil-hasil yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Parameter rasio beban aksial, koefisien keefektifitas pengekangan, dan geser merupakan factor yang mempengaruhi kebutuhan tulangan pengekangan.
2. Usulan formulasi pengekangan yang diajukan adalah $\frac{A_{sh}}{sb_c} = \frac{3}{8}\alpha + 1 - \frac{5}{8}\sqrt{\alpha^2 - \beta^2} \frac{P}{A_{ch}f_{yt}} \geq 0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}}$. Dalam usulan formulasi ini adalah dengan menggunakan pengekangan dengan baja mutu tinggi dibatasi sampai dengan 800 Mpa.
3. Model yang diusulkan, Model proposed 1, merupakan model dengan performa yang paling baik dibandingkan dengan model-model lainnya dimana pengukuran performa model dilakukan secara kuantitatif dengan perhitungan statistic menghasilkan nilai C yang paling besar yaitu sebesar 0.4095 juga menghasilkan nilai A yang paling kecil sebesar 0.043.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan adalah diharapkan adanya penelitian lebih lanjut mengenai usulan formulasi pengekangan yang diajukan dalam tinjauannya dalam *finite elemen method* (FEM).

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318 (2011). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318M-11) and Commentary ", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich,473.
- ACI Committee 318 (2014). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary ", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 667.
- ACI Innovation Task Group 4 (2007). "Specification for High-Strength Concrete in Moderateto High Seismic Applications (ACI ITG-4.3R-07)." American Concrete InstituteFarmington Hills, Mich., 10.
- ASCE/SEI (2006). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Reston, VA,.
- Bayrak, O., and Sheikh, S. A. (1998). "Confinement Reinforcement Design Considerations For Ductile HSC Columns." ASCE Journal of Structural Engineering, 124(9), 999-1010.
- Berry, M., Parrish, M., and Eberhard, M. (2004). PEER Structural Performance DatabaseUser's Manual (Version 1.0), University of California, Berkeley.
- Blume, J. A., Newmark, N. M., and Corning, L. H. (1961). "Design of multistory reinforced concrete buildings for earthquake motions", Portland Cement Association, Skokie, Ill.
- Coulomb, C. A. (1773), "Essai sur une Application des Re`gles de Maximis et Minimis a` quelques Proble`mes de Statique Relatifs a` l'Architecture", Proc., l'Acade'mie Royale des Sciences par divers savans, et lu`s dans ses assemble'es, Me'moires de Mathe'matique et de Physique, Vol. 7, 343–382 (in French).
- CSA Committee A23.3 (2004). "Design of Concrete Structures (CSA A23.3-04)." Canadian Standard Association, Mississauga, Canada,, 214.
- Cusson, D., and Paultre, P. (1995). "Stress-Strain Model For Confined High-Strength Concrete." ASCE Journal of Structural Engineering, 121(3), 468-477.
- Elwood, K. J., Maffei, J., Riederer, K. A., and Telleen, K. (2009). "Improving ColumnConfinement, part 1 : Assessment of design provisions." Concrete International 31(11),32-39.
- Hwang, S.-J., Hwang, G.-J., Chang, F.-C., Chen, Y.-C., and Lin5, K.-C. (2013). "Design of Seismic Confinement of Reinforced Concrete Columns Using

- High Strength Materials." Reinforced Concrete Columns with High Strength Concrete and Steel Reinforcement (SP-293), American Concrete Institute, Toronto, Canada.
- Legeron, F., and Patrick Paultre (2003). "Uniaxial Confinement Model for Normal- and High-Strength Concrete Columns." *ASCE Journal of Structural Engineering*, 129(2), 241-252.
- Li, B., and Park, R. (2004). "Confining Reinforcement for High-Strength Concrete Columns." *ACI Structural Journal*, 101(3), 314-324.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988). "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete." *ASCE Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- NZS Committee P 3101 (2006). "Concrete Structures Standard – The Design of Concrete Structures (NZS3101 Part 1)." Standards New Zealand, Wellington, New Zealand, 256.
- Paulay, T., and Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley and Sons Inc, New York.
- Paultre, P., and Légeron, F. (2008). "Confinement Reinforcement Design for Reinforced Concrete Columns." *ASCE Journal of Structural Engineering*, 134(5), 738-749.
- Pujol, Santiago., Sozen, Mete., and Ramirez, Julio (2000). "Transverse reinforcement for columns of RC frames to resist earthquakes", *ASCE*.
- Razvi, S., and Saatcioglu, M. (1994). "Strength and Deformability of Confined High-Strength Concrete Columns." *ACI Structural Journal*, 91(6), 678-687.
- Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. (1928). "A Study of The Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses." *Bulletin No 185*, University of Illinois, Urbana.
- Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. (1929), "The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression", *Bull. No. 190*, University of Illinois Engrg. Experiment Station, 26(31), 52.
- Saatcioglu, M., and Razvi, S. R. (2002). "Displacement-Based Design of Reinforced Concrete Columns for Confinement." *ACI Structural Journal*, 99(1).
- SNI 2847 (2013). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung (SNI 2847:2013)*, Badan Standar Nasional, Jakarta.
- Watson, S., Zahn, F. A., and Park, R. (1994). "Confining Reinforcement For Concrete Columns." *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120(6), 1798-1824.

LAMPIRAN

Column T70-N29-D4 ;

MODEL PROPOSED 1

B=600mm; H=600mm; $\rho = 0.022$; $f'_c = 88$ MPa; $f_{yt} = 735$ MPa; $f_{yt} = 820$ MPa)

V=3088 kN ; Ach = 270400mm² P=9126 kN

$$\sigma_a = \frac{P}{h_c b_c} = \frac{9126000}{270400} = 33.75 \text{ MPa}$$

$$\nu = \frac{V}{h_c b_c} = \frac{3080000}{270400} = 11.42 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 4 \frac{0.05 f'_c}{\sigma_a} + 3 = 4 \frac{0.05(88)}{\sigma_a} + 3 = 3.521$$

$$\beta = 4(\nu / \sigma_a) = 4(11.42 / 33.75) = 1.35$$

$$k_n = \left(\frac{n_{ls}}{n_{ls} - 2} \right) \left(\frac{h_x + 300}{500} \geq 1 \right) = \left(\frac{16}{16 - 2} \right) \left(\frac{130 + 300}{500} \geq 1 \right) = 1.14$$

$$\frac{A_{sh}}{sb_c} \min = 0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}} = 0.09 \frac{88}{816} = 0.0097$$

$$\frac{A_{sh}}{sb_c} = \frac{3}{8} \alpha + 1 - \frac{5}{8} \sqrt{\alpha^2 - \beta^2} \frac{P}{A_{ch} f_{yt}} = \frac{3}{8} 3.521 + 1 - \frac{5}{8} \sqrt{3.521^2 - 1.35^2} \frac{9126000}{270400 \cdot 820} = 0.013919$$

$$\frac{A_{sh}}{sb_c} = 0.013919 \text{ (used)}$$

Column T70-N29-D4 ;

MODEL PROPOSED 2

B=600mm; H=600mm; $\rho = 0.022$; $f'_c = 88$ MPa; $f_{yt} = 735$ MPa; $f_{yt} = 820$ MPa)

V=3088 kN ; Ach = 270400mm² P=9126 kN

$$\sigma_a = \frac{P}{h_c b_c} = \frac{9126000}{270400} = 33.75 \text{ MPa}$$

$$\nu = \frac{V}{h_c b_c} = \frac{3080000}{270400} = 11.42 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 4 \frac{0.03 f'_c}{\sigma_a} + 3 = 4 \frac{0.03(88)}{\sigma_a} + 3 = 3.3156$$

$$\beta = 4(\nu / \sigma_a) = 4(11.42 / 33.75) = 1.35$$

$$k_n = \left(\frac{n_{ls}}{n_{ls} - 2} \right) \left(\frac{h_x + 300}{500} \geq 1 \right) = \left(\frac{16}{16 - 2} \right) \left(\frac{130 + 300}{500} \geq 1 \right) = 1.14$$

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} \min = 0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}} = 0.09 \frac{88}{816} = 0.0097$$

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} = \frac{3}{8} \alpha + 1 - \frac{5}{8} \sqrt{\alpha^2 - \beta^2} \frac{P}{A_{ch} f_{yt}} = \frac{3}{8} 3.3156 + 1 - \frac{5}{8} \sqrt{3.3156^2 - 1.35^2} \frac{9126000}{270400 \cdot 820} = 0.01695$$

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} = 0.01695 \text{ (used)}$$